

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-527101

(P2004-527101A)

(43) 公表日 平成16年9月2日(2004.9.2)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>H01S 3/06  
H01S 3/10

F1

H01S 3/06  
H01S 3/10B  
Z

テーマコード(参考)

5F072

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 74 頁)

(21) 出願番号 特願2002-551956(P2002-551956)  
 (86) (22) 出願日 平成13年12月18日(2001.12.18)  
 (85) 翻訳文提出日 平成15年6月23日(2003.6.23)  
 (86) 国際出願番号 PCT/GB2001/005626  
 (87) 国際公開番号 W02002/050964  
 (87) 国際公開日 平成14年6月27日(2002.6.27)  
 (31) 優先権主張番号 0031463.3  
 (32) 優先日 平成12年12月21日(2000.12.21)  
 (33) 優先権主張国 英国(GB)

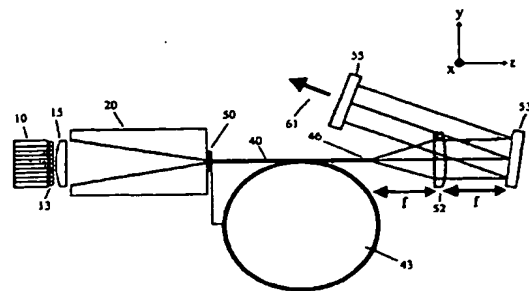
(71) 出願人 500125788  
 ユニバーシティ、オブ、サウサンプトン  
 UNIVERSITY OF SOUTH  
 AMPTON  
 イギリス国サウサンプトン、ハイフィール  
 ド  
 (74) 代理人 100064908  
 弁理士 志賀 正武  
 (74) 代理人 100108578  
 弁理士 高橋 昭男  
 (74) 代理人 100089037  
 弁理士 渡邊 隆  
 (74) 代理人 100101465  
 弁理士 青山 正和

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ファイバレーザ

## (57) 【要約】

ファイバベースの光源は、ポンプ光源としてハイパワーレーザーダイオードスタックを備え、該スタックの出力は、フォーカスと光集束要素とを使用することによって細長断面の強烈なビームへ形作られる。ビームは、高効率にポンピングするために、細長断面の内部クラッドを有するファイバをクラッドポンプするために用いられる。優れたモード品質を有する高出力パワーを達成するために、全体の大きなコア領域は、活性イオンでドーブされ、かつ線形アレイで内部クラッド内に配置された個々の複数のコアを有するようファイバを配置することによって提供される。個々の各コアはシングルモード操作用に配置され、その結果複数のシングルモードレーザの出力が生成され、これにより一つのシングルモードハイパワー出力を生成するよう結合され得る。光源はまた、レーザ又は増幅器として配置することもできる。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

一つ又は複数のレーザーダイオードバーを含みかつポンプ放射を放出することのできるレーザーダイオードスタックと、  
前記ポンプ放射を細長断面を有するビームにフォーカスすることのできるビーム形成光学素子と、  
細長断面の内部クラッドを有し、かつ端部のうちの少なくとも一つにポンプ光のビームが接続されるよう構成された光ファイバと、  
活性イオンでドーブされ、前記内部クラッドの前記細長断面と平行に配置された全細長断面を有し、かつ前記内部クラッドを介して前記ポンプ放射を吸収して誘導放出によって出力放射を発生して放出するよう構成された一つ又は複数の光ファイバコアと、  
を備えていることを特徴とする光放射源。

10

## 【請求項 2】

請求項 1 記載の光放射源において、  
前記誘導放出はレーザ発振を発生し、前記一つ又は複数の光ファイバコアは、前記出力放射の光フィードバックを提供することのできる光キャビティ内に配置されていることを特徴とする光放射源。

## 【請求項 3】

請求項 1 記載の光放射源において、  
前記誘導放出は光増幅を発生し、前記一つ又は複数の光ファイバコアは、前記ポンプ放射の吸収から発生したゲインによって増幅されるべき信号放射を受けるよう構成されていることを特徴とする光放射源。

20

## 【請求項 4】

請求項 1 から 3 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、  
前記一つ又は複数の光ファイバコアは、前記光ファイバの前記内部クラッド内に位置していることを特徴とする光放射源。

## 【請求項 5】

請求項 4 記載の光放射源において、  
前記第 1 光ファイバと並んで配置された一つ又は複数の付加的な光ファイバをさらに備え、ポンプ光が前記一つ又は複数の付加的なファイバの内部クラッドに付加的に接続されていることを特徴とする光放射源。

30

## 【請求項 6】

請求項 1 から 3 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、  
前記一つ又は複数の光ファイバコアは、前記第 1 光ファイバの内部クラッドと光通信するよう構成された第 2 光ファイバの内部クラッド内に位置していることを特徴とする光放射源。

## 【請求項 7】

請求項 6 記載の光放射源において、  
関連付けられた複数のビーム形成光学素子及び複数の光ファイバを有する一つ又は複数の付加的なレーザーダイオードスタックをさらに備え、  
各光ファイバは、前記第 2 光ファイバの前記内部クラッドと光通信するよう構成された内部クラッドを有することを特徴とする光放射源。

40

## 【請求項 8】

請求項 1 から 7 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、  
前記一つ又は複数の光ファイバコアは、線形アレイに配置された複数のコアを備えていることを特徴とする光放射源。

## 【請求項 9】

請求項 8 記載の光放射源において、  
前記複数のコアは、前記線形アレイに沿って実質的に等間隔に隔離されていることを特徴とする光放射源。

50

## 【請求項 10】

請求項 8 記載の光放射源において、  
前記複数のコアは、前記線形アレイに沿って不規則に隔離されていることを特徴とする光放射源。

## 【請求項 11】

請求項 8 から 10 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、  
前記複数のコアのそれぞれは、単一空間モードを有するビームの出力放射を放出するように配置されていることを特徴とする光放射源。

## 【請求項 12】

請求項 8 から 11 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、  
前記複数のコアのそれぞれによって放出された前記出力放射を単一出力ビームへ結合することのできるビームコンバイナーをさらに備えていることを特徴とする光放射源。

10

## 【請求項 13】

請求項 12 記載の光放射源において、  
前記複数のコアのそれぞれは、異なる波長で動作し、前記ビームコンバイナーは、単一出力ビームを形成する共通の角度で各コアの出力が回折されるよう構成された回折格子とコリメータレンズとを備えていることを特徴とする光放射源。

## 【請求項 14】

請求項 1 から 7 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、  
前記一つ又は複数の光ファイバコアは、細長断面を有する単一コアを備えていることを特徴とする光放射源。

20

## 【請求項 15】

請求項 1 から 15 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、  
前記光ファイバは、実質的に平らな長側面を有する細長断面を有することを特徴とする光放射源。

## 【請求項 16】

請求項 15 記載の光放射源において、  
前記一つ又は複数の光ファイバコアは、前記ポンプ放射の吸収によって発生した熱の除去を容易にするために、前記ファイバの長側面に対して非対称に位置していることを特徴とする光放射源。

30

## 【請求項 17】

請求項 1 から 16 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、  
前記一つ又は複数の光ファイバコア内の前記活性イオンは、ネオジム、イッテルビウム、エルビウム、トリウム、又は他の希土類元素のうちの少なくとも一つを含むことを特徴とする光放射源。

## 【請求項 18】

請求項 1 から 17 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、  
前記ビーム形成光学素子は、前記レーザーダイオードスタックから前記ポンプ放射を受け、かつ減少された寸法のビームを生成するために前記ポンプ放射を複数回反射することができる光コンセンレータを含むことを特徴とする光放射源。

40

## 【請求項 19】

請求項 18 記載の光放射源は、  
前記複数の反射は、一つ又は複数の鏡面を使用することによって達成されることを特徴とする光放射源。

## 【請求項 20】

請求項 18 記載の光放射源において、  
前記複数の反射は、プリズム内の内部反射によって達成されることを特徴とする光放射源。

## 【請求項 21】

請求項 18 から 20 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、

50

前記ビーム形成光学素子は、前記光コンセントレータの前面に位置しかつ複数反射の量を減少させるために前記ポンプ放射をフォーカスすることのできる円柱レンズをさらに備えていることを特徴とする光放射源。

【請求項 22】

請求項 18 から 21 のうちいずれか一項に記載の光放射源において、

前記光コンセントレータは、ポンプ放射のビームが実質的にあらゆる方向に等しいビーム発散角度で発生するように配置されていることを特徴とする光放射源。

【請求項 23】

請求項 1 から 22 のうちいずれか一項に記載の光放射源を 2 つ以上備え、かつ、前記光ファイバコアの位置する前記内部クラッドが前記出力放射の放出される箇所と並んで位置するよう配置された光学装置。

【請求項 24】

一つ又は複数のレーザーダイオードバーを備えたレーザーダイオードスタックからポンプ放射を発生させる段階と、

前記ポンプ放射を細長断面を有するビームヘフォーカスする段階と、

前記ポンプ放射を細長断面の内部クラッドを有する光ファイバの少なくとも一端部へ接続する段階と、を備え、ポンプ放射を光ファイバの少なくとも一端部へ接続する前記段階によって、前記ポンプ放射が、前記内部クラッドを通過するとともに、活性イオンでドーピングされかつ前記内部クラッドの細長断面と平行に配置された全細長断面を有する一つ又は複数の光ファイバコアによって吸収され、誘導放出によって出力放射が発生しかつ放出されることを特徴とする光放射の発生方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、レーザに関し、より特にはレーザービームのパワーを増加させる技術に関する。

【0002】

【従来の技術及び発明が解決しようとする課題】

優れたビーム特性を有する高平均出力レーザービームが必要とされるところでは、レーザに多くの用途がある。そのような用途には、溶接、穿孔、精密加工、けがき、切断、材料処理、並びに薬及び防衛における応用が含まれる。例えば、約  $10\ \mu\text{m}$  の波長で動作する二酸化炭素レーザ、及び約  $1\ \mu\text{m}$  のより短い波長で動作する、アーク灯でポンプされた又はダイオードレーザでポンプされた固体結晶レーザ（例えば Nd:YAG）を含む、高出力レーザービームを発生させるためには多くの異なるアプローチがある。どちらの場合でも、 $1\text{ kW}$  を超える出力パワーを有するレーザが説明されてきた（例えば非特許文献 1）。二酸化炭素レーザは、ずっとより長い動作波長を有する固体レーザと比べて不利である。このように、厳格にフォーカスされたとき、短い波長の固体レーザは、同一の出力パワーを有する二酸化炭素レーザよりもずっと高いレーザ強度を生み出すことができる。不運にも、高出力固体レーザは、レーザポンピングサイクルのために、レーザ媒体で発生した熱がレーザ効率及びビーム特性を劣化させる強力な熱効果（非特許文献 2）を生み出し、さらには応力により誘起されたレーザロッドの破壊のためにレーザを故障させる可能性があるという問題に苦しんでいる。レーザ媒体における熱の発生と関連した問題のいくつかを緩和するための多くの案が報告されてきた（例えば非特許文献 1）が、キロワット及びそれ以上の出力レベルで動作する固体レーザに対する満足な解決策は、いまだに確立されていない。最終的な結果は、高平均出力固体レーザがしばしば、 $M^2$  ビーム伝搬率  $\gg 1$ （多くの場合キロワットクラスのレーザに対して  $M^2$  は約  $10 \sim 100$  である）であり、かつより低い出力で動作するレーザと比べて低効率である、というようにビーム特性に劣ることである。このことが、特に高出力と優れたビーム特性（つまり高光度）との組み合わせを必要とする区域での適応性を制限してきた。

【0003】

10

20

30

40

50

高出力ダイオードレーザでポンプされたクラッドを有するダブルクラッドファイバーレーザは、優れたビーム特性及び高い効率を維持する一方で、レーザ出力をスケールリングする他の手段を提供する（例えば非特許文献3, 4）。このレーザ配置では、レーザポンピングサイクルのために発生した熱をファイバの長い範囲に亘って分配することができ、損傷を受ける可能性が減少する。その上、出力ビーム特性はいまや、単一空間モード出力ビームを選択するよう適応させることができる、活性レーザイオンでドープされたコアの導波路特性によって決定される。従来の「バルク」レーザ結晶と比べて、熱レンズは一般にファイバレーザのビーム特性にほとんど影響を与えない。このように、クラッドポンプファイバーレーザは、従来の「バルク」固体レーザの性能にとって非常に不利益な、熱によって誘起された問題に大きく影響を受けない。これらの魅力にもかかわらず、従来のクラッドポンプファイバーレーザが有するのは、複数のダイオードレーザからより高いポンプ出力を内部結合する際の困難と、単一空間モードのビーム特性を維持しつつレーザ強度によって誘起される損傷を回避するようにコア領域をスケールリングしなければならないといった制限と、の組み合わせによる制限された出力スケールリング能力のみである。クラッドポンプファイバーレーザに関して報告されている最大出力パワーは110Wである（非特許文献4）。

#### 【0004】

さらなる出力スケールリングに対して鍵となる要求は、不利益な非線形効果と高い内部キャビティ・レーザ強度による損傷とを回避するためにコア領域を増加させる能力である。C o o kらによって報告された（非特許文献5）、この要求を達成するための一つの方法は、それぞれが単一のコアを有する複数のファイバレーザを使用し、これらレーザのビームを、コリメータレンズと回折格子と半透ミラーとからなり出力カプラーとして用いられるレーザキャビティと共通の断面で、単一のレーザビームに結合することである。個々のファイバは、ファイバの端部（ポンプ内部結合端部と反対の）が線形アレイの極近くに位置するよう構成されており、この線形アレイは、ファイバ端面からコリメータレンズの焦点距離とほぼ等しい距離に位置するコリメータレンズと、ファイバ端面からコリメータレンズの焦点距離の2倍の距離に位置する回折格子と、を有する。このように、回折格子の動作は、ファイバレーザが回折格子で単一のビームに結合されるように、各ファイバレーザの波長を自動的に選択することである。ファイバコアが各ファイバレーザのシングルモード動作を保証するよう選択されるならば、結果としてスペクトル結合されたビームもまたシングルモードである。このように、出力スケールリングに対するアプローチは、ビーム特性を劣化させることなく有効コア領域（すなわち結合されたコア領域）の増加を可能とするために、ガラスホストでは典型的な、広いゲインの線幅を利用することである。ビーム結合に対する同様のアプローチは、広いストライプの線形ダイオードレーザアレイにおいて構成要素の出力を結合するために用いられてきた（非特許文献6）。

#### 【0005】

しかしながら、出力スケールリングに対するアプローチは、多くの重大な欠点を有している。第一に、各ファイバは、適切な内部結合光学素子を有する一つ又は複数のレーザダイオードアレイによってポンプされねばならない。商業的に利用可能なダイオードレーザから利用できる最大ポンプ出力は現在のところ、40～60Wの範囲（レーザ配置及び製造業者に依存する）であり、ファイバ当たりの最大出力パワーを約40W又はそれよりも小さい値まで制限する。このように、結合された出力を非常に高い出力レベルまでスケールリングするには、それぞれが独自のダイオードレーザポンプ光源と一連のポンプ内部結合光学素子とを備えた多くのダイオードポンプファイバを必要とする。例えば、1キロワット以上の結合出力は、25よりも多くのダイオードポンプファイバを必要とする。最終的に結果として、極度に複雑かつ高価なレーザシステムとなり、適応性を制限することになる。このアプローチのさらなる欠点は、隣接するファイバにおけるコアの最小間隔は、ファイバの内部クラッドの直径（又は外部寸法）と同様である可能性があるということである。この最小間隔は通常、ダイオードポンプレーザの効率的な内部結合を保証するために選択され、したがって使用されたレーザダイオードの種類と内部結合光学素子の構成と

に依存する。現在の世代の高出力ダイオードバーポンプ光源と最適に構成されたポンプビーム条件及び焦点光学とに対して、必要とされる内部クラッドのサイズは通常 $>200\mu\text{m}$ であり、これは典型的なシングルモードコアの直径よりもずっと大きい。このようにして結合され得るファイバレーザの数に対する上限、したがって結合されたシングルモード出力が設定される。というのも、コアからコアまでの間隔は、隣接するファイバの動作波長の間隔にほぼ比例し、レーザ媒体は有限のゲイン・バンド幅を有するのみだからである。このアプローチのさらなる欠点は、各ファイバが、ポンプと内部結合するこれらファイバの端部に位置する別体の高反射体（例えば誘電ミラー又は内部ファイバブラッグ格子（*in-fibre Bragg grating*））を必要とし、該反射体は、効率的なレーザ動作にフィードバックするために、ポンプ波長において高い透過性をもち、かつレージング波長において高い反射率をもたねばならないことである。高出力レーザシステムにおいては、これによって多くのミラー、追加の複雑性、及びレーザに対する余分なコストが必要となる。この従来技術のアプローチのさらなる欠点は、アレイにおけるファイバのそれぞれが、各ファイバ端面がコリメータレンズの焦平面に存在するように、かつコア位置が、コア径よりもずっと小さいコア位置において、あらゆる偏差を有して直線上に置かれるように、独立かつ正確に整列されねばならないということである。これらの整列条件は、結合された出力ビームに対して優れたビーム特性を保証するのに必要とされるが、整列方法にかなり余分な複雑さを追加し、達成する上では多大な費用を要することがある。これらの特徴を組み合わせたものは、従来技術で述べたように、制限された実用値での出力スケーリングのための技術を実現する。

#### 【0006】

高出力を達成するためのさらなるファイバベースのアプローチは、特許文献1に開示されている。ファイバレーザは、リボンファイバ内に配置された多くの平行な導波路を含む。シングルモード動作を達成するために、各導波路は、ハイオーダーモードを抑制するために一方向には狭いが、より広いコア領域を与えてパワーを増加させるために直交方向に広い、コアを有する。この方向のハイオーダーモードは、モードフィルターとファイバに形成された吸収体とを用いることによって除去される。ファイバは、レーザーダイオードバーと一緒にサイドポンプされ、一のバーからのポンプ光が隣のバーからの光が導入される前に完全に吸収されるように、ファイバの長手方向に沿って配置されている。いくつかのバーは、出力を適切にスケーリングする必要があり、このためにファイバの長さが非実用的に長くなることがある。また、サイドポンピング構成は、ファイバに沿ってポンプ光を導くために、ファイバ内に透過格子を必要とする。全体的にみれば、リボンファイバの構造は複雑なので、製造コストが高くなる。

#### 【0007】

##### 【非特許文献1】

C. Stewen, M. Larionov, A. Giesen and K. Con tag, "Yb:YAG thin disk laser with 1kW output power," in Trends in Optics and Photonics, vol. 34, (Optical Society of America, Washington, D. C.) (2000), p. 35-41.

##### 【非特許文献2】

A. K. Cousins, "Temperature and thermal stress scaling in finite-length endpumped solid-state laser rods," IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, (1992), p. 1057-1069.

##### 【非特許文献3】

R. A. Hayward, W. A. Clarkson, P. W. Turner, J. Nilsson, A. B. Grudinin and D. C. Hanna, "Efficient cladding-pumped Tm-doped silica fibre laser with high power single-mode o

output at 2  $\mu$ m," Electron. Lett., vol. 36, (2000), 711-712.

【非特許文献4】

V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts, S. Sanders, S. Bicknese, R. Dohle, E. Wolak, P. S. Yeh and E. Zucker, "110W fibre laser," Electron. Lett., vol. 35, (1999), p. 1158-1160.

【非特許文献5】

C. C. Cook and T. Y. Fan, "Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity," in Trends in Optics and Photonics, vol. 26, (Optical society of America, Washington, D. C.), (1999), p. 163-166.

10

【非特許文献6】

V. Daneu, A. Sanchez, T. Y. Fan, H. K. Choi, G. W. Turner and C. C. Cook, "Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity", Opt. Lett., vol. 25, (2000), p. 405-407.

20

【特許文献1】

欧州特許第1059707号明細書

【0008】

【課題を解決するための手段】

この発明に係る出力スケーリングのためのアプローチは、従来技術の限界を克服するために新奇なレーザ構成を使用し、ファイバレーザの実際的な、効率的な、かつ比較的低コストな出力スケーリングを、優れたレーザビーム特性を維持しつつ非常に高い平均出力レベルにすることを可能にし、かくして多くの応用要求に役立つ。

【0009】

この発明の第1の態様は、一つ又は複数のレーザダイオードバーを含みかつポンプ放射を放出することのできるレーザダイオードスタックと、前記ポンプ放射を細長断面を有するビームにフォーカスすることのできるビーム形成光学要素と、細長断面の内部クラッドを有し、かつ端部のうちの少なくとも一つにポンプ光のビームが接続されるよう構成された光ファイバと、活性イオンでドーパされ、前記内部クラッドの前記細長断面と平行に配置された全細長断面を有し、かつ前記内部クラッドを介して前記ポンプ放射を吸収して誘導放出によって出力放射を発生して放出するよう構成された一つ又は複数の光ファイバコアと、を備えていることを特徴とする光放射源に向けられている。

30

【0010】

そのようなシステムは、ファイバベースの光源をポンプするためにレーザダイオードスタックから利用できる高出力を利用する。レーザダイオードスタックの出力は通常、比較的劣ったビーム特性を有するが、この論点は、出力を細長形状の高強度ビームへ形作ることによってこの発明において検討されている。これによって、より伝統的な円形ビームが試みられた場合よりもより高い強度のビームが与えられ、強度は効率的なポンピングを達成する上で重要である。細長ビーム形状から最大の利点を引き出すために、ビームは細長断面のファイバをクラッドポンプ (cladding-pump) するように用いられ、結合は、ポンプをファイバへ効率的に接続するだけでなく、一つ又は複数のコアを様々な配置で使用することを容易にできる。

40

【0011】

一つ又は複数の光ファイバコアが、出力放射の光フィードバックを提供することのできる光キャビティー内に配置されている場合には、誘導放出がレーザ発振を発生することができる。あるいは、一つ又は複数の光ファイバコアが、ポンプ放射の吸収から発生したゲイ

50

ンによって増幅されるべき信号放射を受けるよう構成されている場合には、誘導放出が光増幅を発生することができる。このように、本発明は、レージング及び増幅の両方に適切であり、したがって広い形態の応用に利用することができる。

#### 【0012】

一つ又は複数の光ファイバコアは、光ファイバの前記内部クラッド内に位置することができる。この配置は、単一のファイバのみが必要とされ、その結果光源は比較的単純であるということを意味する。その上、光源はさらに第1光ファイバと並んで配置された一つ又は複数の付加的な光ファイバを備えてよく、ポンプ光が一つ又は複数の付加的なファイバの内部クラッドに付加的に接続されている。これにより、ファイバは基本的には一つのより大きなファイバを形成するために隣接して配置されるので、製造され得るファイバのサイズに制限がある場合にはシステムをスケールアップすることができる。

10

#### 【0013】

あるいは、一つ又は複数の光ファイバコアは、第1光ファイバの内部クラッドと光通信するよう構成された第2光ファイバの内部クラッド内に位置してもよい。ポンプレシーピングファイバ (p u m p - r e c e i v i n g f i b r e) からドープされたコアまでの間隔は、システム構成により柔軟性を提供し、したがってある状況においてより適切なものとすることができる。例えば、この構成は、増幅器を用いるのに適合している。というのも、一つ又は複数のコアは自由端部を有するファイバ内に収容されており、該一つ又は複数のコアには、ポンプ放射が第1ファイバへ接続されるのとは異なり、増幅されるべき光信号を容易に接続することができるからである。また、光源は、関連付けられた複数のビーム形成光学要素及び複数の光ファイバを有する一つ又は複数の付加的なレーザーダイオードスタックをさらに備えてよく、各光ファイバは、第2光ファイバの内部クラッドと光通信するよう構成された内部クラッドを有する。このように、多くのレーザーダイオードスタックからのポンプ放射は、単一のコアを含むファイバへ都合よく接続することができる。かくして利用できるポンプ出力を増加させることができる。

20

#### 【0014】

一つ又は複数の光ファイバコアは、線形アレイに配置された複数のコアを備えてよい。複数のコアは、単一の大面積コアに固有のマルチモード・ビームの問題なしに全体の大きなコア領域を提供するので、出力スケーリングの問題に優れた解決策を提供する。また、複数の小さなコアを使用することで大方解決される単一の大面積コアを使用することと関連した熱レンズのような熱に関する問題もある。

30

#### 【0015】

複数のコアは、線形アレイに沿って実質的に等間隔に隔離されていてよく、あるいは、線形アレイに沿って不規則に隔離されていてよい。これらの配置は、光源の出力の波長プロファイルに適応させるための範囲を与える。光源と共に使用され得るあるビーム結合構成は、各コアが作動する波長を線形アレイの位置に応じて異ならせる回折格子を使用する。かくしてコアは、所望の出力波長結合を与えるためにファイバ内に位置させることができる。

#### 【0016】

複数のコアのそれぞれは、単一空間モードを有するビームの出力放射を放出するよう配置されてよい。ビームを単一の出力へ結合する必要がある場合には、この構成によってシングルモードの単一出力ビームを容易に達成することができる。

40

#### 【0017】

複数のコアを有する光源は、複数のコアのそれぞれによって放出された出力放射を単一出力ビームへ結合することのできるビームコンバイナーをさらに備えてよい。そのような光源においては、複数のコアのそれぞれは、異なる波長で動作することができ、ビームコンバイナーは、単一出力ビームを形成する共通の角度で各コアの出力が回折されるよう構成された回折格子とコリメータレンズとを備えている。この種のビームコンバイナーは、光源の線形アレイから放射された結合ビームに適合する。これらビームコンバイナーはまた、個々のビームのビーム特性を維持することができ、その結果複数のシングルモードビー

50



ムを結合している出力は近回折限界 (near-diffraction limited) となり得る。

【0018】

他の実施形態では、一つ又は複数の光ファイバコアは、細長断面を有する単一コアを備えている。この種のコアは、シングルモード出力を与えないが、一つの等価なコア領域を複数のコアが可能とするよりも小さな物理的領域に与えることができ、その結果出力スケールリングをいっそう効果的とし、同一サイズの複数のコアファイバが可能とするよりも大きくすることができる。

【0019】

光ファイバは、実質的に平らな長側面を有する細長断面を有する。この形状のファイバは、一つ又は複数のコアをファイバの外面の比較的近くにすることができ、これにより改善された熱除去が提供される。表面が平らであることによって、ファイバとヒートシンクとの間の接触をよくすることができ、その結果熱除去が効率的になる。熱を巧みに消失させることは、効率的な性能を達成しかつ熱によって誘起された損傷を制限する上で重要である。

10

【0020】

一つ又は複数の光ファイバコアは、ポンプ放射の吸収によって発生した熱の除去を容易にするために、ファイバの長側面に対して非対称に位置させることができる。熱がファイバの表面付近で発生する場合には、そのような熱はどのようなものであっても、ヒートシンクによってより直ちに吸収され得る。

20

【0021】

一つ又は複数の光ファイバコア内の活性イオンは、ネオジウム、イッテルビウム、エルビウム、トリウム、又は他の希土類元素のうちの少なくとも一つを含み得る。例えば、ネオジウム又はイッテルビウムは、約  $1\ \mu\text{m}$  の波長を有する出力を発生することができ、エルビウム及びイッテルビウムは共に、約  $1.5\ \mu\text{m}$  の波長を与え、トリウムは約  $1.8\sim 2.1\ \mu\text{m}$  の波長を与える。希土類ドーパントを有するファイバは、回折格子に基づくビームコンバイナーを用いることで利用することができる広いゲイン・バンド幅を有し、複数のコアを異なる波長で振動させる。その上、複数コアの場合には、様々なコアは、多波長の出力を与えるために、異なる活性イオン又は複数の活性イオンの組み合わせでドーピングすることができる。

30

【0022】

ビーム形成光学要素は、レーザーダイオードスタックからポンプ放射を受けることができ、かつ減少された寸法のビームを生成するためにポンプ放射を複数回反射することができる光コンセントレータを備えることができる。これは所望の細長ビーム形状を達成する簡単な方法である。

【0023】

複数の反射は、一つ又は複数の鏡面を使用することによって達成することができるか、あるいは、プリズム内の全内部反射によって達成することができる。後者のアプローチは潜在的に低損失である。

【0024】

ビーム形成光学要素は、光コンセントレータの前面に位置しかつ複数反射の量を減少させるためにポンプ放射をフォーカスすることのできる円柱レンズをさらに備えている。この構成はまた、光コンセントレータ内で起こる反射量の減少のために、損失を減少させる。

40

【0025】

その上、光コンセントレータは、ポンプ放射のビームが実質的にあらゆる方向に等しいビーム発散角度で発生するように配置されてよい。

【0026】

この発明の第2の態様は、請求項1から22のうちいずれか一項に記載の光放射源を2つ以上備え、かつ、光ファイバコアの位置する内部クラッドが出力放射の放出される箇所と並んで位置するよう配置された光学装置に向けられている。この光学装置は、単一システ

50

ム内で達成可能な全出力をさらにスケーリングする方法を提供する。

【0027】

この発明の第3の態様は、一つ又は複数のレーザーダイオードバーを備えたレーザーダイオードスタックからポンプ放射を発生させる段階と、前記ポンプ放射を細長断面を有するビームヘフォーカスする段階と、前記ポンプ放射を細長断面の内部クラッドを有する光ファイバの少なくとも一端部へ接続する段階と、を備え、ポンプ放射を光ファイバの少なくとも一端部へ接続する前記段階によって、前記ポンプ放射が、前記内部クラッドを通過するとともに、活性イオンでドーブされかつ前記内部クラッドの細長断面と平行に配置された全細長断面を有する一つ又は複数の光ファイバコアによって吸収され、誘導放出によって出力放射が発生しかつ放出されることを特徴とする光放射の発生方法に向けられている。

10

【0028】

ファイバレーザにおいて優れたビーム特性を維持しかつ出力スケーリングするためにキーとなる要件は、

(a) 高出力ダイオードバースタックからポンプ出力を内部結合するための効率的な手段；及び／又は

(b) 高出力ダイオードバースタックからポンプ出力を効率的に内部結合することができ、かつ効率的に熱を除去することができるファイバ内部クラッド幾何学 (fiber inner cladding geometry)；及び／又は

(c) ポンプ光を効率的に吸収することができかつレーザ放射のための導波路として作用し、かつ好ましくは、優れたビーム特性を有し好ましくは回折制限された単一空間モードの出力ビームを有する結合された出力レーザービームを選択することができる、内部クラッド内における活性イオンでドーブされた複数のコアの配置；

20

である。

【0029】

この発明の実施形態に係る出力スケーリングのアプローチは、従来技術の限界を克服するために上述の特徴に組み入れられる。

【0030】

この発明の実施形態は、高出力ポンプ放射を生成するための一つ又は複数のダイオードバースタックと、第1方向のビームサイズが第2 (直交) 方向のビームサイズよりもずっと小さくなるようにポンプビームの横方向のビーム寸法を減少させるためのポンプビーム収集及びビーム形成手段と、前記ポンプ光源からポンプ放射を効率的に内部結合することができる第2方向のサイズよりも小さい第1方向のサイズを有する、細長断面形状のファイバと、効率的な熱除去を可能とする、実質的に平らな第2方向の周囲面と、を備え、前記ファイバは、レーザ放出を発生するための、ドーバントイオンを含む円形断面の複数の導波路コアと、前記コアから放出された結果レーザービームを優れたビーム特性の単一ビームへ結合するための手段と、をさらに備えた高出力ダイオードポンプ光源を提供する。

30

【0031】

このポンプ光源及び他の実施形態は、非常に簡単な構成とすることができ、かつ単純な熱処理で、高品質ビームのレーザ出力をスケーリングすることができるという点で、上述の従来技術を上回る多くの利点を有している。ファイバレーザ出力をスケーリングするための従来の構成を上回るさらなる利点は、非常に高い出力のダイオードバースタックを、単純な内部結合光学素子を備えたポンプ光源として使用することで、複雑さを最小化し、高出力動作に必要なポンプ光源の数を著しく減少させることができるという点である。これにより、従来の出力スケーリングのアプローチと比べて効率的かつ低コストに出力スケーリングすることができる。加えて、ファイバコアの位置はファイバの粗製造段階の間に固定されるので、これらの位置は、直線からほんの僅かに逸脱した線形アレイを形成するように指定することができ、このために非常に単純かつ低コストの整列方法を用いることができる。この発明におけるレーザイオンでドーブされたコアの線形アレイを使用すると、放たれたポンプ放射を効率的に吸収することができ、前記コアからのレーザービームを、

40

50

単一の、高品質な、高出力のレーザービームへ結合することを容易にする。

#### 【0032】

この発明の実施形態は好ましくは、各コアからのレーザービームを単一の高品質ビームへ結合する手段を備える。好ましくは、この発明に係るレーザは、隣接するコアと比べて僅かに異なる波長で各コアのレーザ動作を実施するために回折格子を備え、該回折格子はまた、レーザキャビティ内の各コアからのビームを単一の高品質ビームへ結合する。これらコアは、様々な応用の要求に応じるために、希土類イオン： $1\mu\text{m}$ のスペクトル領域でレーザ放出を提供するためにネオジウム又はイッテルビウム； $1.5\mu\text{m}$ のスペクトル領域でレーザ放出を提供するためにエルビウム及びイッテルビウムの共ドーピング；及び $\sim 1.8\mu\text{m}$ から $2.1\mu\text{m}$ のスペクトル領域でレーザ放出を提供するためにトリウム；でドーピングすることができる。加えて、これらコアは、もし必要ならば、非常にごく近く（個々の単一コアのファイバに対するよりもずっと近く）に位置させることができ、隣接するコアの小さな波長間隔を回折格子の所定のピッチに選択すること、したがってより多くのコアをさらなる出力スケールリングに対して使用することができる。好ましくはこれらコアは、それぞれがビーム伝播率（beam propagation factor） $M^2 \approx 1$ を有する単一の高品質ビームへ結合された単一空間モードを発生するように構成される。このように、この発明の実施形態に係るレーザ又は光源は、高輝度ビームにおいて高い平均出力を提供することができ、多くの応用のニーズに答える。

#### 【0033】

本発明をより良く理解するために、かついかにして本発明を実施するかを効果的に示すために、以下に例として与えられた添付の図面を参照する。

#### 【0034】

##### 【発明の実施の形態】

図1（a）及び図1（b）を参照すると、低出力ダイオードレーザ12の一つ又は複数のダイオードレーザアレイ（ダイオードバー）11を備えた高出力ダイオードバースタック（high power diode bar stack）10からのダイオードレーザ放射は、各円柱レンズが隣接するダイオードバーからのレーザ放射を高速ビーム発散方向y（ダイオードレーザ接合に垂直）へコリメートするように、好ましくはコリメートされた各ビームの高さが隣接する各ダイオードバーの間の距離とほぼ等しくなるように配置された円柱コリメータレンズ13のアレイに入射する。次いでダイオードバースタックからのレーザ放射は、x方向の幅がダイオードバースタックビームのx方向の幅よりも小さくなく、好ましくは等しく、かつy方向の幅がダイオードバースタックビームのy方向の幅よりも小さくなく、好ましくは等しい入口開口部22を有する光コンセントレータ（light concentrator）20へ入射する。光コンセントレータはx-z及びy-z平面においてそれぞれ角度23及び24に傾斜した高反射率の表面21を備え、該表面でレーザ放射は集信機を通過する間に複数回反射される（一条の光線30の光路長は例としてのみ示されている）。またレーザ放射は、第1方向（x方向）のサイズが第2方向（y方向）のサイズよりもずっと大きい出口開口部26で小さな面積を有する矩形断面の高強度ビームを生成することが望まれる。好ましい構成においては、光コンセントレータは、高反射率の金属コーティングを有する金属から製造され、角度23及び24、集信機の長さ、及び入口開口部の寸法は、x及びy方向にほぼ等しいビーム発散角度を有する出口開口部において輝度の減少が最小の矩形ビームを製造するよう選択される。

#### 【0035】

例えば、10個のダイオードバーを備え、それぞれが約10mmの長さを有し、 $\sim 1.7\text{mm}$ だけ互いに隔離されている通常のダイオードバースタックは、200～400Wの連続波力とよりいっそう高いパルス出力とを有するダイオードレーザ放射を生成することができる。円柱レンズアレイ13の適切な構成に関して、約1.2mmのビーム高Hは、クロストーク（すなわちコリメータレンズにおけるビームの重なり）のために際立った損失を招くことなく用いることができる。レンズアレイ13の各レンズは好ましくは、非円柱状プロファイルを備えた一面又は両面を有し、光収集効率を最大化しつつレンズ収差によ

る  $y$  方向のダイオードレーザのビーム特性の劣化を最小化するように注意深く整列されている。 $y$  方向のビーム伝播率は、コリメートされた各ダイオードバーに対して  $M_{y,r}^2 < 5$  を容易に達成することができ、 $M_{y,r}^2 \approx 1$  はレンズ構成及び整列を注意深く最適化することで可能となる。ダイオードスタックからの結合された結果ビームは、 $M_{y,r}^2 \approx N s M_{y,r}^2 / H$  によって大まかに与えられた  $y$  方向のビーム特性因子を有する。ここで、 $N$  はスタックにおけるバーの数であり、 $s$  は  $y$  方向のダイオードバーの中心から中心までの間隔である。 $y$  方向のコリメーションに対して円柱レンズアレイを有する通常の 10 バーダイオードスタックでは、 $\sim 1.4 < M_{y,r}^2 < 7.0$  である。

#### 【0036】

各ダイオードバーアレイに平行な直交方向 ( $x$  方向) では、ダイオードスタックに対するビーム特性因子  $M_{x,r}^2$  は、単一のダイオードバーに対するビーム特性因子  $M_{x,r}^2$  にほぼ等しい。通常のダイオードスタックに対しては、 $M_{x,r}^2 \approx 2500$  である。直交方向に対するビーム特性因子のこの大きなミスマッチは、ダイオードバースタックの出力を高強度円形ビームにフォーカスすることを非常に困難にする。直交面に対するビーム特性因子の大きな違いは、ビームを、円形ビームが有するよりもずっと高い強度を有する矩形ビームに転換することができる、ということを暗示する。ポンプ放射の低損失ガイドに要求されるように、最終ビームが、 $\sin(\theta)$  がファイバレーザの内部クラッドの開口数よりも小さくなるように選択されたビーム発散  $\theta$  (半分の角度) を有する場合には、最高強度 (すなわち最小領域) ビームは、アスペクト比が  $W_x / W_y \approx M_{x,r}^2 / M_{y,r}^2$  である矩形の断面を有する。ここで、 $W_x$  及び  $W_y$  は、それぞれ  $x$  及び  $y$  方向のビーム全幅である。

#### 【0037】

クラッドでポンプされたファイバレーザの性能は、ファイバ損失、放出されたポンプ出力、及びポンプ吸収効率を含む、多くの因子によって決定される。ポンプ放出効率を弱めることなく内部のコア領域に対するクラッド領域の比を最小化するファイバ構成を用いると、しばしばポンプをファイバの短い距離で効率的に吸収させることができるので重大であり、これによってキャビティ損失が減少し、自己パルス及びファイバへ損傷を引き起こし得る非線形効果が減少する。このように、ダイオードスタックポンプ光源の特性は、内部クラッド、或いはアスペクト比が  $w/t \approx W_x / W_y \approx M_{x,r}^2 / M_{y,r}^2$  である細長又は矩形断面のポンプガイド、を有するリボンファイバの使用を暗示する。このようにして、高出力ダイオードスタックポンプ光源の限界を克服することができ、適切な矩形内部クラッド構成とレーザイオンのドープされた複数のコアを有するファイバレーザの出力スケールリングとを理想的にする。例として、 $x-z$  平面及び  $y-z$  平面の両方に開口数 0.4 の内部クラッドを有するファイバは、直交面のビーム発散角  $\theta_x \approx \theta_y < 0.46 \text{ rad}$  を有するポンプビームを必要とする。 $M_{y,r}^2 = 5$  の場合には、大雑把なガイドとして最小領域ポンプビームは、 $915 \text{ nm}$  のポンプ波長  $\lambda_p$  に対しては  $W_x \approx 2 M_{x,r}^2 \lambda_p / \pi \theta_x \approx 3 \text{ mm}$  及び  $W_y \approx 2 M_{y,r}^2 \lambda_p / \pi \theta_y \approx 63 \mu\text{m}$  でほぼ与えられたビーム幅を有する。ポンプ放射を効率的に内部結合させるには、ファイバ内部クラッドは、 $x$  方向に  $w > W_x$  の幅及び  $y$  方向に  $t > W_y$  の厚さを必要とする。より多くのバーを有するダイオードスタックでは、より大きな厚さ  $t$  の内部クラッドを有するファイバが必要とされるが、最も実場的な場面では内部クラッドの厚さ  $t$  は常に内部クラッドの幅  $w$  よりもずっと小さい。このように、このアプローチを用いると、ダイオードバースタックからの非常に高いポンプ出力は、効率的にファイバに放出され得る。全ての場合において、ポンプ光コンセントレータ 20 は、コリメータレンズアレイ 13 の極近くに配置され、かつコリメータレンズアレイ 13 の後でポンプ放射を効率的に収集することができるように入口開口部の寸法に構成され、そしてコンセントレータの長さ及び内部反射面の傾斜角 23 及び 24 とは、出口開口部 26 で細長矩形ビームを発生するために、ビーム特性因子  $M_{x,r}^2 / M_{y,r}^2$  の変化及び損失を最小とするよう選択される。

#### 【0038】

ポンプビーム収集及びビーム形成光学素子の他の構成においては、他の点では図 1 (a)

10

20

30

40

50

及び図 1 (b) の構成と同一の図 2 (a) 及び図 2 (b) に示すように、焦点距離が光コンセントレータ 20 の長さとはほぼ等しいか又は僅かに光コンセントレータ 20 の長さよりも長い円柱レンズ 15 が、y 方向にポンプビームをフォーカスするために、レンズアレイ 13 の後段かつ光コンセントレータ 20 の直前に配置されている。この配置は、反射面 21 での反射損失を減少させるのを助け、かつ光コンセントレータから出現するビームに対する y 方向のビーム特性の劣化を減少させる。

#### 【0039】

ポンプビーム収集及びビーム形成光学素子の他の構成においては、図 3 (a) 及び図 3 (b) に示すように、光コンセントレータ 20 は、x 方向 (ダイオード接合と平行) のポンプビームサイズとはほぼ等しい入口開口部 22 と、面 21 での複合的な全内部反射の後にのみ x 方向のビームサイズを減少させるために作用する、ずっと小さい幅 (典型的には 1 mm から 3 mm の幅) の出口開口部 26 と、を有する透明材料 (例えばシリカガラス) から作られたプリズムの形態に製造される。y 方向 (ダイオード接合と垂直) のビームサイズは、出口開口部 26 で又は出口開口部 26 をちょうど過ぎたところでビームウェストを生成するよう構成された焦点距離の円柱レンズ 15 を用いてフォーカスすることによって減少する。ダイオードポンプ光は全内部反射によって集信機 20 の表面 21 で反射されるので、ポンプビーム再形成及び送出素子の構成は、損失がより小さくなり得る図 1 (a)、図 1 (b)、図 2 (a)、及び図 2 (b) に示された配置を上回る魅力を有する。

#### 【0040】

あるいは、化合物レンズシステムが、ダイオードバースタックの出力を所望の細長断面を有するビームへ形作ると共に適切にフォーカスするために用いられ得る。

#### 【0041】

光コンセントレータから出現するポンプ光 30 は、光コンセントレータの出口開口部 26 の近く又は出口開口部 26 のちょうど内部にファイバを位置させることによって、マルチコアリボンファイバ (図 4 A、図 4 B、図 4 C、図 4 D、及び図 4 E に示されている好ましい構成) の内部クラッド 40 へ放出される。好ましい実施形態 (図 4 A に示されている) では、内部クラッドは矩形の断面又はほぼ矩形 (細長) の断面を有し、レーザイオン (例えば約  $1 \mu\text{m}$  の波長でレーザ振動を可能とするためにネオジウム又はイッテルビウム、約  $1.5 \mu\text{m}$  の波長でレーザ振動を可能とするためにエルビウム及びイッテルビウム、又は約  $1.8 \sim 2.1 \mu\text{m}$  の波長でレーザ振動を可能とするためにトリウム) でドーブされた複数 (2 つ又はそれ以上) の導波路コア 41 を含む。好ましい配置では、コア径及びコアの屈折率は、単一空間モードを選択することができるよう選ばれる。これらコア 41 は、x 方向 (すなわちダイオードバースタック方向に平行かつ内部クラッドの細長断面に平行) の線形アレイに配置され、それ故にコアは共に全て細長断面を有する。図 4 A は矩形の断面を有するファイバを示すが、実際には、ファイバ延伸プロセスにおける表面の張力によって、図 4 B に示すように、僅かに丸みのある端部を有するファイバとなりそうである。また、図 4 A ~ 図 4 E に示されているコアは円形の断面であるが、正方形又は矩形のような他の断面が用いられてよい。一の構成において、コアは、等しい隔離距離  $d$  を有し、内部クラッドの各長い面の間の途中に配置される (図 4 A 及び図 4 B)。他の構成において、コアは、熱除去を促進しかつダイオードスタックによってポンプされたときのコアの温度上昇を最小化するために、内部クラッドの 2 つの長い面のうちの一つのごく近くに位置している (図 4 C)。図 4 D に示すように、さらなる構成において、各コアは、共にごく近くに位置しており、リボンファイバの全幅  $w$  には及ばない。この構成により、波長の結合されたコアに対するレージングバンド幅が減少すると同時に、ダイオードバースタックの効率的な内部結合が準備される。なおさらなる構成 (図 4 D に示す) において、コア 41 は、線形アレイに配置されるが、レーザの出力波長スペクトルを複数の指定された波長を必要とする特定の応用に適合させることを可能にするために、異なる距離 ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , 等) で隔離される。全ての構成において、内部クラッド 40 の幅  $w$  及び厚さ  $t$  は、ポンプ光をリボンファイバへ効率的に放出することができるよう、光コンセントレータの出力ビームの寸法とはほぼ等しいか又は出力ビームの寸法よりも僅かに大きい。ある

いは、光コンセンレータから現れるポンプ光は、レンズの配置によってファイバの端面に映されてよい。

#### 【0042】

ファイバはまた、内部クラッドにおけるダイオードポンプ放射の導波路を保証するために、内部クラッドよりも低い屈折率の外部クラッド（図5に示す）を備える。好ましい構成において、外部クラッド42は、単一の材料から形成されており、図5（a）に示すように内部クラッド40を取り囲んでいる。内部クラッド材料の選択は、内部クラッドが好ましくは0.4よりも大きな高い開口数を有するようにするべきである。一の構成において、図5（b）に示すように、外部クラッドは、内部クラッドの表面と密着した又は接触して配置された異なる材料（それぞれは内部クラッドよりも屈折率が低い）から形成されている。好ましい構成において、内部クラッド40は、内部クラッドの外面に適用された同一又は異なる低屈折率材料44及び45の付加的なコーティングを有する低屈折率材料42の薄層で被覆されたヒートシンク43上に配置されている。これら材料のうち一つ又は複数は、液体又は空気であってよい。

#### 【0043】

内部クラッドの幅を増加させるために、それぞれが矩形又は細長の内部クラッド内に活性レーザーイオンでドーブされたコアの線形アレイを備えた2つ又はそれ以上のリボンファイバ（図4A、図4B、図4C、図4D、及び図4Eに示されたような）は、各ファイバの一端部又は両端部を他のファイバと接触して配置させることによって結合され得る。図6は、例としてのみ、このように配置された3つのファイバを示す。この構成は、レージングコアの数を増加させることによって結合されたファイバレーザのさらなる出力スケールを可能にし、付加的な又は高出力のダイオードバースタックをファイバの内部クラッドに放出することを可能にする。この構成はまた、製造限界のために単一のファイバに対するアスペクト比 $w/t$ のいかなる制限も克服することを可能にする。

#### 【0044】

図7（a）及び図7（b）はそれぞれ、レーザーイオンのドーブされたコアのそれぞれを同時にレーザ動作するためのこの発明の好ましい実施形態を示す概略側面図及び平面図である。高出力ダイオードバースタック10からのポンプ放射は、収集されて既に述べたようにして極端に強い細長矩形ビームへ再形成され、マルチコアリボンファイバ40の内部クラッドへ放出される。図7（a）及び図7（b）において、ファイバは、例としてのみ5つのコアを有する。実際には、コア数の選択は、内部クラッド及びコアサイズ、レーザーイオンのスペクトル特性、ダイオードバースタックの波長、及び意図されたファイバレーザの出力パワー、を含む多くの要因に依存する。ミラー50は、レージング波長で高い反射率及びポンプ波長で高い透過率を有するよう選択され、効率的なレーザ動作に必要なフィードバックを提供するためにファイバの端部を内部結合するポンプに固定されている。あるいは、ミラー50は、ファイバの端部を内部結合するポンプ上に直接配置された、レージング波長に対して高い反射率を有しかつポンプ波長に対して高い透過率を有する多層誘電コーティングによって、又はレージングにおける所望の反射特性とポンプ波長とを提供するためにファイバコアのそれぞれに書き込まれた内部ファイバブラッグ格子（*in-fibre Bragg grating*）によって置き換えることができる。さらなる変形例は、図3（a）及び図3（b）に対するプリズム光コンセンレータと共に用いるために、プリズムの端面に誘電コーティングのようなコーティングを提供すること、及びコーティングに対してファイバを隣接させることである。コーティングは、動作に必要なフィードバックを提供するために、ポンプ波長で高い透過率を有し、かつレージング波長で高い反射率を有する。このコーティングの利点は、コーティングが損傷した場合にプリズム表面の新しい部分へファイバを動かすことができるという点である。

#### 【0045】

ファイバはまた、レーザポンピングサイクルの間に生成された熱を除去するために、好ましくは液体で冷却され得るヒートシンク43上に配置されている。ファイバの細長矩形の幾何学は、容易なヒートシンク、したがって効率的な熱の除去を見込んだもので、これは

従来技術を上回るこの発明の他の利点である。ファイバの長さは好ましくは、ダイオードスタックからのポンプ放射を効率的に吸収すること、及び各レージングコア上で効率的にレーザを動作することを保証するよう選択される。ファイバのレーザ出力面46は、レーザ振動に必要なさらなるフィードバックを提供するよう準備（例えばポリシングによって）される。必要な場合には、フィードバック（すなわちファイバ端部の反射率）の増加は、多層誘電コーティングを所望の反射特性を有する端面へ適用することによって、又はファイバのコアにブラッグ格子を書き込むことによって達成することができる。本発明のこの実施形態（図7（a）および図7（b）に示された）は、複数のレーザービーム60に高いレーザ出力パワーを生成するための手段を提供する。x方向の結合された出力ビームのビーム特性因子 $M_{c,x}^2$ は、ほぼ $M_{c,x}^2 \approx q d M_{f,x}^2 / \phi_f$ で与えられ、ここでqはコアの数であり、dは各コアの中心間の間隔であり、 $\phi_f$ はコアの直径であり、 $M_{f,x}^2$ は単一コアからのレーザービームのビーム特性因子である。直交平面（すなわちファイバレイに直角）において、結合ビームに対するビーム特性因子 $M_{c,y}^2$ は、単一ビームに対するビーム特性因子とはほぼ同一である（すなわち $M_{c,y}^2 \approx M_{f,y}^2$ ）。好ましい実施形態において、各コアは、 $M_{f,x}^2 \approx M_{f,y}^2 \approx 1$ となる単一空間モードビームを生成するよう構成されている。x方向のビーム特性は、レージングコアのアレイから各ビームを同時にコリメートするためにファイバの直後に配置されたコリメータレンズのアレイを用いることによって、因子 $\sim d / \phi_f$ だけ改善することができる。

#### 【0046】

本発明の他の好ましい実施形態（図8（a）及び図8（b）に示された）において、ファイバレーザはまた、個々のファイバレーザからのビームを単一の高品質ビームへ結合するための手段を含む。この手段は、単にコリメータレンズ52と回折格子53とレージング波長に対する部分透過性を有する出力結合ミラー55とを含む外部キャビティを加えることによって達成される。コリメータレンズ52は好ましくは、レージング波長でコーティングされた非反射性のものであり、ファイバの端面46から焦点距離とほぼ等しい間隔に位置している。あるいは、コリメータレンズ52は、複数のレンズを含む複合レンズのような代替のコリメータ構成と置き換えることができる。この構成は、収差を減少させるために用いることができる。この回折格子53は好ましくは、レージング波長の範囲に亘って第1次数の回折ビームに高い反射率を与えるためにブレースされており、示されたようにレンズからコリメータレンズ52の焦点距離とほぼ等しい距離に位置している。回折格子は好ましくは、各コアからのレーザ放射が、結合された回折レーザービームがレンズ52とレンズのホルダとのそばを減衰することなく通過することができる、入射ビームと回折されたビームとの間の可能な限り最小の角度で、-1第1次ビームへ回折されるように整列されている。部分透過性ミラー55は好ましくは、結合された第1次回折ビームを逆反射するよう整列されており、これにより各コアのレーザアクションに必要なフィードバックが提供される。

#### 【0047】

ファイバレーザの動作原理は、次の通りである。各レーザコアは、各コアのレーザ振動に対してフィードバックを提供するために拡張されたキャビティを用いて、他のコアとは独立して動作し、部分透過性ミラー55からの出力を提供する。回折格子53に関して出力カプラー55の配向は、出力カプラーからフィードバックされた全てのレーザービームに対して、回折格子上に共通の入射角 $\theta_i$ を定義する。回折格子の作用は、出力カプラー55によってフィードバックされたレーザービームのそれぞれが標準に対して僅かに異なる角度 $\theta_{d,j}$ で回折格子53において回折され、したがってレンズ55によって対応するコアへフォーカスされるように各レーザコアの波長を自動的に選択することであり、これによってレーザ動作に必要なフィードバック・ループが完成する。大雑把なガイドに従って、j番目のコアのレージング波長 $\lambda_j$ は $\lambda_j = \Lambda [\sin(\theta_i) + \sin(\theta_{d,j})]$ で与えられ、ここで $\Lambda$ は回折格子上の直線間隔である。このように、隣接するレージングコアの波長間隔 $\Delta\lambda$ は、ほぼ $\Delta\lambda = \Lambda (\sin(\theta_{d,j}) - \sin(\theta_{d,(j+1)})) \approx \Lambda d \cos(\theta_d) / f$ （ $d/f \ll 1$ という条件で）で与えられ、ここでfはレンズ

10

20

30

40

50

52の焦点距離であり、 $\theta_d$ は平均回折角であり、 $d$ は隣接するレージングコアの中心間隔である（例えば図4A、図4B、及び図4Cに示すように）。このようにファイバ構成と、コア間隔と、コリメータレンズの直径及び焦点距離と、回折格子のサイズ及び直線間隔とを注意深く選択することによって、レーザ遷移 $\Delta\lambda_L$ に対するゲイン・バンド幅よりもずっと小さくするために隣接するコアの波長間隔を選択することが可能となる。 $\Delta\lambda_L / \Delta d \cos(\theta_d)$ に係る大雑把なスケールを許容でき、かつ標準的な構成要素を有するコアの最大数は、必要な場合には100よりも大きな数となるよう作ることができる。好ましい構成において、ファイバ端面46は、フィードバックを抑制するよう用意され、別の状況では外部キャビティのためにフィードバックに対抗することができ、これによって外部キャビティがコアの波長を選択するように作用することができる有効線幅が制限される。これは例えば、レージング波長で非反射性コーティングを有するファイバ端面46をコーティングすることによって、又は端面46を角度研磨することによって、又はファイバの端面46上にガラスブロック（好ましくはコアと同一の屈折率を有する）を光学的に接触させることによって達成することができる。コアの導波特性は好ましくは、各コアが単一空間モードビームのみを提供するように選択され、その結果として、結合された出力ビーム61はほぼ、非常に優れたビーム特性を用いて制限された回折である。コアは、異なる波長でレーザ振動することができるように、異なる活性レーザイオンでドープすることができる。例えば、ネオジム又はイッテルビウムイオンが、 $\sim 1\mu\text{m}$ でレージング波長を提供するために用いることができ、エルビウム及びイッテルビウムイオン両方を有する共ドープが $1.5\mu\text{m}$ でレージング波長を提供するために用いることができ、トリウムイオンが、 $1.8\sim 2.1\mu\text{m}$ でレージング波長を提供するために用いることができ、これにより多くの異なる応用に役立つ。加えて、既述したように、他の希土類イオンを、他の波長を与えるために、単独で又は共ドープされた化合物で用いることができる。実際は、多波長源を与えるために、ファイバ内に異なる個々のコアを、異なる活性イオンでドープすることができる。

#### 【0048】

他の配置において、コア間隔は、特定の用途に必要なとされるように（例えば固体レーザのポンピング）、単一の高出力レーザビームへ結合された（例えば図4Eに概略的に示されたファイバ構成を用いて）多くの特定の波長でレーザ動作を選択するよう適合させることができる。要するに、ダイオードバースタックから高度に細長くされた矩形の内部クラッドを有するリボンファイバへ高いポンプ出力を内部結合する能力を、新しい線形マルチコアアレイ及び各コアからレーザビームを結合している内部波長のための手段と結び付け、結合されたコア領域を増加させるために典型的なガラスホストである広いゲイン線幅を利用する出力スケールアップのためのこのアプローチは、非常に高い出力パワー（1kW）を単一の高品質レーザビーム内で得ることを可能にする。その上、高度に細長くされた矩形ファイバ幾何学は、比較的容易なヒートシンクを用意し、したがってレージングポンピングサイクルの一部として生成された望まれない熱を効率的に除去する。

#### 【0049】

図9(a)及び図9(b)に示された他の好ましい実施形態において、ファイバレーザは、Qスイッチ58を回折格子53と出力カプラー55との間の外部キャビティへ挿入することによって高ピーク出力及び高平均出力の組み合わせを達成するために、パルス(Qスイッチ)モードで動作され得る。

#### 【0050】

図10(a)及び図10(b)に示された他の好ましい実施形態において、複数のコアの出力ビームの波長結合は、レーザキャビティの外で達成される。この場合、各コアに対するレーザ振動のためのフィードバックは、ファイバの一端部又は両端部にあり、かつ所望の波長で波長に依存したフィードバックを生み出すよう選択された格子周期を有する、内部ファイバブラッグ格子によって達成される。（もし必要ならば）レーザ振動に対する付加的なフィードバックが、ミラー或いはコーティングされた又はコーティングされていない垂直に磨かれたファイバ端面46によって提供される。個々のコアの動作波長は、レン



ズ 5 2 からほぼ  $f$  に等しい距離に配置された線間隔  $\Lambda$  の回折格子 5 3 上に角度  $\theta_{ij}$  で入射する、ファイバ出力端部からほぼ  $f$  に等しい距離に配置された焦点距離  $f$  のレンズ 5 2 によってビームがコリメートされたときに、ビームが回折格子から共通の角度  $\theta_d$  で回折されて高品質の単一レーザービーム 6 1 を形成するように、式  $\lambda_j = \Lambda (\sin(\theta_{ij}) + \sin(\theta_d))$  に従って選択される。好ましくは、これらのコアはそれぞれ、単一空モード出力ビームを生成するよう構成されており、結果として結合されたレーザービーム 6 1 はほぼ回折限界である。

#### 【0051】

他のアプローチが、既に述べた方法を組み合わせたスペクトルビームの代わりとして、個々のコアによって放出されたビームを結合するために用いられ得る。例えば、コアは同一の波長でそれぞれが放出するように配置することができ、外部フェーズ・ロック構成は、これら単一周波数出力を単一コヒーレントビームへフェーズ・ロックするために提供され得る。これは達成するのが比較的困難だが、この方法で位相を制御するとビームを導くことができるという利点を提供する。

#### 【0052】

あるいは、ある量のクロストークを各ファイバコア間で起こさせることによって、フェーズ・ロックを内部で達成することができる。

#### 【0053】

図 1, 2, 3, 4 A ~ 4 E, 5, 6, 7, 8, 9, 及び 10 に述べたように、この発明の実施形態に係る出力スケールアップアプローチは、一つ以上のダイオードバースタックによってポンピングを可能とするように簡単に拡張することができる。一つの好ましい実施形態（図 11 (a) 及び図 11 (b) に示された）において、それぞれがビーム収集及び再形成手段 2 5 を有する単一のダイオードスタックと、コア 4 0 の線形アレイを含む細長矩形内部クラッドを有するリボンファイバと、を備えたダイオードスタックでポンプされた複数のファイバ（この実施例では 3 つ）は、これらコアが長い線形アレイ（例えば図 6 に示すように）を形成するようにファイバ端部 4 6 を互いの近くに位置させることによって、単一のビーム 6 1 へ結合されている。前記コアからの出力ビームは、コリメータレンズ 5 2 と回折格子 5 3 と部分透過性の出力カップリングミラー 5 5 とを含む外部キャビティを使用することによって単一の高品質ビームへ結合され得る。以前のように、外部フィードバックキャビティの作用は、高品質の単一出力ビーム 6 1 を形成するために結果ビームが回折格子で内部キャビティと結合されるように、活性イオンのゲイン・バンド幅内で僅かに異なる波長で動作することを各コアに強要することである。ファイバ端部 4 6 からのフィードバックを抑制するために、かつしたがってこのように結合され得るファイバレーザの数を最大化するために、ファイバ端面は好ましくは、非反射性コーティングされ、角度ポリッシュされ又は磨かれたガラスブロックと光学的に接触して配置されるべきである。高ピーク出力でパルスされた、結合されたレーザ源の動作がまた、必要ならば回折格子 5 3 と出力カップリングミラー 5 5 との間の外部キャビティに Q スイッチを挿入することによって、達成され得る。

#### 【0054】

あるいは、複数のダイオードバースタックポンプ光源は、図 1 2 に示すようなアプローチを介して単一のファイバへ結合させることができる。この場合、単一ダイオードバースタックは、図 1 (a) 及び図 1 (b)、又は図 2 (a) 及び図 2 (b)、又は図 3 (a) 及び図 3 (b) に示すような構成を介して、細長矩形ポンプガイドを有しかつコアをもたないリボンファイバ 4 8 へ放出され、次いでこれらのファイバはレーザイオンでドーブされたコアの線形アレイを含むリボンファイバ 4 0 と光学的に接触して配置される。図 1 2 に示された一つの好ましい実施形態において、コアを有するリボンファイバは、低屈折率のクラッド材料 4 2 でコーティングされた金属ヒートシンクの周囲に包まれており、コアのないポンプ送出ファイバ (pump delivery fibre) 4 8 は、コアを有するリボンファイバ 4 0 の頂部の周囲に巻きつけられている。次いでさらなる保護低屈折率クラッド層 4 2 が、ポンプ送出ファイバ 4 8 の頂部の周囲に巻きつけられていよい。ファ

10

20

30

40

50

ファイバ40の内部クラッドは好ましくは、屈折率 $n_c$ を有する材料から作られるべきであり、ポンプ送出ファイバ48は、屈折率 $n_p$ を有する材料から作られるべきである。ここで、 $n_c \geq n_p$ である。好ましい構成において、ファイバ40の内部クラッドとポンプファイバ48との両方は、シリカから製造される。外部クラッド層42は、 $n_c$ 及び $n_p$ よりも低い屈折率を有する材料から製造されるべきである。この構成において、ポンプ放射は、2つのファイバが光学的に接触している領域でポンプ送出ファイバ48から複数コアリボンファイバ40へ通過し、よってポンプ放射はコア内でレーザゲイン媒体によって吸収され得る。ファイバ48及び40の大きく平らな表面は、光学的な接触の大きな区域を用意し、かつしたがって複数コアリボンファイバ内で効率的にポンプ吸収が起こる。加えて、ファイバ40の大きく平らな表面は、容易なヒートシンクを可能にし、かつしたがってコア内で生成された望まない熱を効率的に除去する。このアプローチによって複数のダイオードバースタックを複数コアリボンファイバへ内部結合することが可能となり、また外部キャビティを使用することによって（図8及び図9に示すように）、単一の高品質ビーム内で非常に高い連続的な波すなわちパルス出力を達成することができる。

#### 【0055】

上で述べられたレーザの様々な実施形態は、増幅器として用いるために適合させることができる。適合に必要なことは、ダイオードスタックからのポンプ光と増幅されるべき光信号との両方がリボンファイバへ結合される必要があるということである。付加的なコアレス・リボンファイバ48を使用してダイオードスタックからポンプ光を受け取るために、活性イオンでドープされたコア41を有するリボンファイバ40の端部が自由になるので、図12の実施形態はこれに適合している。したがって、増幅されるべき信号は、適切な結合光学を用いて、コア41を有するリボンファイバ49の端部へ直接放出され得る。

#### 【0056】

図7(a)及び図7(b)の実施形態はまた、増幅器として用いることもできる。この場合、リボンファイバ40の一端部はポンプ光を直接受けるので、信号はほとんど直ちに、レーザの実施形態においてレーザ出力を放出する端部であるファイバの他端部からファイバ40へ放出される。

#### 【0057】

図13は、そのような増幅器の簡易化された概略図を示す。細長断面を有するビーム形態のポンプ光100は、上述のようにダイオードバースタックと光濃縮光学(light concentrating optics)とを含むポンプ光源102から生成される。ポンプ光は、上述したように、一つ又は複数のコアを有するリボンファイバ40へ放出される。

#### 【0058】

ポンプ波長で高い透過率を有し、かつ信号波長で高い反射率を有するミラー104が、ポンプ光源102とファイバ40との間に設けられている。あるいはミラー104は、レーザの実施形態に対して上述されたように、ファイバ端部又はポンプ光を集結させるために用いられたいかなるプリズムの端面で誘電コーティングと、又はファイバへ書き込まれた格子と置き換えることができる。

#### 【0059】

信号は、信号ビーム108の一部をファイバへ導くビームスプリッター106を介してファイバ40の遠い端部へ放出される。適切なビーム形成光学素子（図示せず）が、効率的な結合を達成するために信号ビームをフォーカスするよう用いられる。

#### 【0060】

動作中、信号はファイバ40に沿って伝播し、ポンプ光によってファイバコアに生成されたゲインによって増幅される。ミラー102に達すると、増幅された信号は、ファイバ40の下方へ反射され、最初に放出されるファイバ端部を介して抜け出る。最終的に増幅された信号110は、ビームスプリッター106を介して増幅システムの外で結合される。

#### 【0061】

増幅器の増幅された出力は、必要ならば単一ビームへ結合されてよい。各コアは同一の信

10

20

30

40

50

号波長で動作されていそうなので、外部フェーズ・ロック構成を利用するビーム結合方法が適合している。

【0062】

本発明のレーザ及び増幅器両方の実施形態に関して、リボンファイバ40のさらなる実施形態を用いることができる。

【0063】

図14は、ファイバ40の実施形態の断面図を示す。以前に述べた実施形態と共通して、内部クラッド120は、細長断面のビームヘフォーカスされたダイオードバースタックからポンプ光を効率的に受けるよう構成された、実質的に矩形の細長断面を有する。しかしながら、このファイバは、細長断面の単一コア122を有する。

10

【0064】

この形状のコアは、単一空間モード出力を発生しないであろう。しかしながら、より大きな寸法がマルチモードとなる一方で、コア寸法がシングルモードとなるべく出力ビームに対して十分小さくなるよう、より小さなコア寸法が選択され得る。したがって、この種のファイバは、上で述べたように、スペクトルビームコンバイナーと共に用いるのには適しておらず、シングルモード出力が必要とされる場合でも適切ではない。しかしながら、コア領域は複数の個々のコアの全コア領域と少なくとも同じ位大きくすることができるので、この種のファイバはなお、他の実施形態の出力スケージングの利点を提供する。実際に、個々の各コアの間に必要な間隔は存在しないので、同一のコア領域が、より小さな物理的区域に提供され得る。このことは、全サイズのファイバ製造にかかるいかなる制限に対しても有利なものとなり得るものである。

20

【0065】

要するに、この発明の態様は、一つ又は複数のダイオードバースタック・ポンプレザと、前記ダイオードバースタックから高度に細長くされた矩形の内部クラッドを有するリボンファイバへポンプ放射を効率的に内部結合する手段と、を備えたレーザシステムを提供し、前記ファイバはさらに、レージング波長の範囲にゲインを与えるために、活性レーザイオンでドーピングされた2つ以上の導波コアの線形アレイを備え、前記レーザシステムはまた、各レージングコアから高出力かつ優れたビーム特性を有する信号出力へ、放出されたレーザービームを結合するための手段を備える。

30

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)及び(b)はそれぞれ、ビーム収集及びビーム形成光学素子の第1構成を備えた、この発明の実施形態で使用するためのダイオードレーザースタックを示す概略平面図及び側面図である。

【図2】(a)及び(b)はそれぞれ、ビーム収集及びビーム形成光学素子の第2構成を備えたダイオードレーザースタックを示す概略平面図及び側面図である。

【図3】(a)及び(b)はそれぞれ、ビーム収集及びビーム形成光学素子の第3構成を備えたダイオードレーザースタックを示す概略平面図及び側面図である。

【図4A】この発明の他の実施形態に係るコアの他の構成を備えたマルチコアリボン光ファイバを示す概略断面図である。

【図4B】この発明の他の実施形態に係るコアの他の構成を備えたマルチコアリボン光ファイバを示す概略断面図である。

40

【図4C】この発明の他の実施形態に係るコアの他の構成を備えたマルチコアリボン光ファイバを示す概略断面図である。

【図4D】この発明の他の実施形態に係るコアの他の構成を備えたマルチコアリボン光ファイバを示す概略断面図である。

【図4E】この発明の他の実施形態に係るコアの他の構成を備えたマルチコアリボン光ファイバを示す概略断面図である。

【図5】(a)及び(b)は、外部クラッド構成の他の実施例に関する光ファイバの概略断面図である。

【図6】より広い幅の結合ファイバを提供するために複数のファイバが一端部又は両端部

50

で密接に接触して結合又は配置された光ファイバの概略断面図である。

【図 7】 (a) 及び (b) はそれぞれ、本発明の一実施形態を示す概略側面図及び平面図である。

【図 8】 (a) 及び (b) はそれぞれ、本発明の第 2 実施形態を示す概略側面図及び平面図である。

【図 9】 (a) 及び (b) はそれぞれ、本発明の第 3 実施形態を示す概略側面図及び平面図である。

【図 10】 (a) 及び (b) はそれぞれ、本発明の第 4 実施形態を示す概略側面図及び平面図である。

【図 11】 (a) 及び (b) はそれぞれ、本発明の第 5 実施形態を示す概略側面図及び平面図である。 10

【図 12】 本発明の第 6 実施形態を示す概略断面図である。

【図 13】 本発明の第 7 実施形態を示す概略図である。

【図 14】 リボンファイバのさらなる実施形態を示す概略断面図である。

【符号の説明】

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| 1 2 | ダイオードレーザ              |
| 1 1 | ダイオードレーザアレイ (ダイオードバー) |
| 1 0 | ダイオードバースタック           |
| 1 3 | コリメータレンズ (レンズアレイ)     |
| 2 2 | 入口開口部                 |

## 【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau(43) International Publication Date  
27 June 2002 (27.06.2002)

PCT

(10) International Publication Number  
WO 02/50964 A2

(51) International Patent Classification: H01S 3/00

(21) International Application Number: PCT/GB01/05626

(22) International Filing Date: 18 December 2001 (18.12.2001)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(36) Priority Data: 0031463.3 21 December 2000 (21.12.2000) GB

(71) Applicant (for all designated States except US): UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON (GBAGB): Highfield, Southampton SO17 1BJ (GB).

(72) Inventors: and

(73) Inventors/Applicants (for US only): CLARKSON, WILLIS, A. (GBAGB); Centre for Enterprise Innovation, University of Southampton, Highfield, Southampton SO17 1BJ, Hampshire (GB). HARWOOD, Decca, W., J.

(GBAGB): Centre for Enterprise Innovation, University of Southampton, Highfield, Southampton SO17 1BJ, Hampshire (GB). TURNER, Paul, W. (GBAGB); Centre for Enterprise Innovation, University of Southampton, Highfield, Southampton SO17 1BJ, Hampshire (GB).

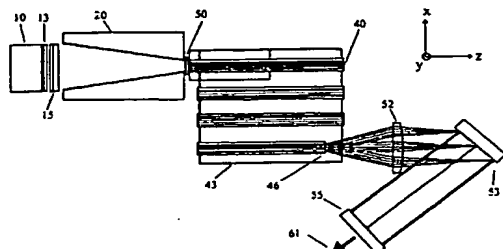
(74) Agents: HAINES, Miles, John et al.; D Young &amp; Co, 21 New Peter Lane, London ECL4 1DA (GB).

(81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GR, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LI, LR, LS, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TH, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent

(Continued on next page)

(54) Title: FIBRE LASER



(57) Abstract: A fibre-based optical source comprises a high power laser diode stack as a pump source, the output of which is shaped into an intense beam of elongate cross-section by use of focusing and light concentrating elements. The beam is used to excite pump a fibre having an inner cladding also with elongate cross-section, to provide high efficiency pumping. To achieve high output powers with a good mode quality, an overall large core area is provided by configuring the fibre to have a plurality of individual cores doped with active ions and arranged within the inner cladding in a linear array. Each individual core is configured for single mode operation, so that a plurality of single mode laser outputs are generated, which can be combined to produce one single mode high power output. The source may also be configured as a laser or as an amplifier.

WO 02/50964 A2

---

WO 02/50964 A2

(BF, BI, CP, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

**Published:**

— without international search report and so be republished upon receipt of that report

WO 02/50964

PCT/GB01/05426

1

TITLE OF THE INVENTIONFIBRE LASERBACKGROUND OF THE INVENTION

5 This invention relates to lasers, and more particularly to a technique for increasing the power in a laser beam.

There are many applications of lasers where a high average power laser beam with good beam quality is required. Such applications include; welding, drilling, precision machining, marking, cutting, materials processing, as well as applications in medicine and defence. There are many different approaches for producing high power  
10 laser beams including, for example, carbon dioxide lasers operating at wavelengths around  $10\mu\text{m}$ , and arc-lamp pumped or diode laser pumped solid state crystal lasers (e.g. Nd:YAG) operating at shorter wavelengths around  $1\mu\text{m}$ . In both cases, lasers with output powers in excess of  $1\text{kW}$  have been demonstrated [e.g. 1]. Carbon dioxide lasers have the disadvantage compared to solid state lasers of a much longer operating  
15 wavelength. Thus, when focussed tightly, a short wavelength solid state laser can produce much higher laser intensity than a carbon dioxide laser with the same output power. Unfortunately, high power solid state lasers suffer from the problem that the heat generated in the laser medium, due to the laser pumping cycle, results in strong thermal effects [2] which can degrade laser efficiency and beam quality, and can even  
20 result in laser failure due to stress induced fracture of the laser rod. Numerous schemes to alleviate some of the problems associated with heat generation in the laser medium have been reported (e.g.[1]), but a satisfactory solution for solid state lasers operating at the kilowatt power level and beyond has yet to be established. The net result is that high average power solid state lasers frequently suffer from poor beam quality  
25 with  $M^2$  beam propagation factors  $\gg 1$  (often  $M^2 \sim 10$  to  $100$  for kilowatt class lasers) and low efficiency compared to lasers which operate at lower powers. This has limited their applicability, particularly in areas which require a combination of high power and good beam quality (i.e. high brightness).

Double clad fibre lasers, cladding pumped by high power diode lasers, offer an alternative means for scaling laser power whilst maintaining good beam quality and high efficiency (e.g. [3,4]). In this laser configuration the heat generated due to the laser pumping cycle can be distributed over a long length of fibre reducing the likelihood of damage. Furthermore, the output beam quality is now determined by the waveguiding properties of the active laser ion doped core, which can be tailored to select a single spatial mode output beam. In contrast to conventional 'bulk' laser crystals, thermal lensing generally has little impact on beam quality in fibre lasers. Thus, cladding pumped fibre lasers are largely immune to the thermally induced problems which are so detrimental to the performance of conventional 'bulk' solid state lasers. In spite of these attractions, conventional cladding pumped fibre lasers have only limited power scalability due a combination of the difficulty in in-coupling higher pump powers from multiple diode lasers, and the limited scope for scaling the core area to avoid laser intensity induced damage whilst maintaining single spatial mode beam quality. The maximum output power reported so far for a cladding pumped fibre laser is 110W [4].

A key requirement for further power scaling is the ability to increase the core area to avoid detrimental nonlinear effects and damage due to the high intracavity laser intensity. One way to achieve this, reported by Cook et al. [5], is to use multiple fibre lasers, each with a single core, and combine their beams into a single laser beam in a common section of the laser cavity, which comprises a collimating lens, a diffraction grating and a partially transmitting mirror, the latter serving as the output coupler. The individual fibres are arranged so that their ends (opposite to the pump in-coupling end) are positioned in close proximity in a linear array with the collimating lens and diffraction grating positioned at respective distances roughly equal to a focal length and twice the focal length of the collimating lens from the fibre end faces. Thus, the action of the diffraction grating is to automatically select the wavelength of each fibre laser so that they are combined into a single beam at the diffraction grating. If the fibre cores are chosen to ensure single mode operation of each fibre laser, then the resulting spectrally combined beam is also single mode. Thus, this approach for



WO 02/50964

PCT/GB01/05426

3

power scaling exploits the broad gain linewidths that are typical in glass hosts to allow the effective core area (i.e. the combined core area) to be increased without degrading beam quality. A similar approach to beam combining has been used to combine the outputs of the elements in a broad stripe linear diode laser array [6].

- 5 This approach for power scaling does however have a number of major drawbacks. Firstly, each fibre must be pumped by one or more laser diode arrays with appropriate in-coupling optics. The maximum pump power available from commercially available diode laser bars is currently in the range 40 to 60W (depending on the laser configuration and manufacturer) limiting the maximum output
- 10 power per fibre to around 40W or less. Thus, scaling the combined power to very high power levels would require many diode pumped fibres, each with its own diode laser pump source and set of pump in-coupling optics. For example, a combined power of over one kilowatt would require in excess of 25 diode pumped fibres. The net result would be an extremely complicated and expensive laser system, limiting its
- 15 applicability. A further disadvantage of this approach is that the minimum separation of the cores in adjacent fibres could be no less than the diameter (or outer dimension) of the fibre's inner cladding. The latter would normally be chosen to ensure efficient in-coupling of the diode pump laser, and hence would depend on the type of diode laser used and on the design of the in-coupling optics. For the present generation of
- 20 high power diode bar pump sources and optimally designed pump beam conditioning and focussing optics, the inner cladding size required would be typically >200µm, which is much greater than a typical single mode core diameter. This sets an upper limit on the number of fibre lasers that can be combined in this way, and hence the combined single mode power, since the core-to-core separation is approximately
- 25 proportional to the separation of the operating wavelengths of adjacent fibres, and the laser medium has only a finite gain bandwidth. A further drawback of this approach is that each fibre needs a separate high reflector (e.g. a dielectric mirror or in-fibre Bragg grating) located at the pump in-coupling end of the fibre, which must have high transmission at the pump wavelength and high reflectivity at the lasing wavelengths to
- 30 provide feedback for efficient laser operation. In a high power laser system this would

WO 02/50964

4

PCT/GB91/05426

lead to a requirement for many mirrors, adding complexity and extra cost to the laser. A further disadvantage of this prior art approach is that each of the fibres in the array must be independently and accurately aligned, so that each fibre end face lies in the focal plane of the collimating lens, and so that the core positions lie on a straight line with any deviation in core position being much smaller than core diameter. These alignment conditions are required to ensure good beam quality for the combined output beam, but add significant extra complexity in the alignment procedure, which may be costly to achieve. The combination of these features render this technique for power scaling, described in the prior art, of limited practical value.

- 10 A further fibre-based approach to achieving high powers is disclosed in EP-A-1 059 707 [7]. A fibre laser includes a number of parallel waveguides arranged within a ribbon fibre. To achieve single mode operation, each waveguide has a core which is narrow in one dimension, to suppress high order modes, but wider in the orthogonal dimension to give a larger core area and hence increased power. High order modes in this dimension are removed by use of mode filters and absorbers built into the fibre. The fibre is side-pumped with laser diode bars, arranged along the length of the fibre so that pump light from one bar can be fully absorbed before light from the next bar is introduced. Several bars are required to scale the power adequately, which may lead to impractically long fibre lengths. Also, the side-pumping arrangement requires transmission gratings within the fibre to direct the pump light along the fibre. Overall, the structure of the ribbon fibre is complex, leading to high fabrication costs.
- 15
- 20

WO 02/50964

5

PCT/GB01/05426

SUMMARY OF THE INVENTION

The approach for power scaling according to this invention uses a novel laser design to overcome the limitations of the prior art, allowing practical, efficient and relatively low cost power scaling of a fibre laser to very high average power levels, whilst maintaining good laser beam quality, thus serving the requirements of numerous applications.

A first aspect of the present invention is directed to a source of optical radiation comprising:

10 a laser diode stack comprising one or more laser diode bars and operable to emit pump radiation;

beam shaping optics operable to focus the pump radiation into a beam with elongate cross-section;

15 an optical fibre having an inner cladding of elongate cross-section and arranged so that the beam of pump light is coupled into at least one of its ends; and

one or more optical fibre cores doped with active ions and having an overall elongate cross-section arranged parallel to the elongate cross-section of the inner cladding, and arranged to absorb the pump radiation via the inner cladding so as to generate and emit output radiation by stimulated emission.

20 Such a system exploits the high powers available from laser diode stacks to pump a fibre-based optical source. The output of laser diode stacks typically has a relatively poor beam quality, but this issue is addressed in the present invention by shaping the output into a high intensity beam of elongate shape. This gives a beam of higher intensity than if a more conventional circular beam is attempted, intensity  
25 being important with regard to achieving efficient pumping. To derive maximum benefit from the elongated beam profile, the beam is used to cladding-pump a fibre of elongate cross-section, a combination which not only offers efficient coupling of the pump into the fibre, but also readily allows the use of various configurations of one or more cores.

WO 02/50964

6

PCT/GB01/05426

The stimulated emission may produce laser action, if the optical fibre core or cores are arranged within an optical cavity operable to provide optical feedback of the output radiation. Alternatively, the stimulated emission may produce optical amplification, if the optical fibre core or cores are arranged to receive signal radiation to be amplified by gain arising from absorption of the pump radiation. Thus the invention is applicable to both lasing and amplification, and can hence be exploited in a wide variety of applications.

The one or more optical fibre cores may be positioned within the inner cladding of the optical fibre. This arrangement means that only a single fibre is needed, so that the source is relatively simple. Furthermore, the source may further comprise one or more additional optical fibres arranged side-by-side with the first-mentioned optical fibre such that pump light is additionally coupled into inner cladding of the additional fibre or fibres. This allows the system to be scaled up in the event that there are limitations on the size of fibre which can be fabricated, as the fibres are placed adjacently to form, in effect, one larger fibre.

Alternatively, the one or more optical fibre cores may be positioned within an inner cladding of a second optical fibre arranged in optical communication with the inner cladding of the first-mentioned optical fibre. The separation of the doped cores from the pump-receiving fibre offers more flexibility in system design, and may therefore be more suitable in certain circumstances. For example, this configuration is well-suited for use as an amplifier, because the core or cores are contained in a fibre having free ends, into which the optical signal to be amplified may readily be coupled, distinct from the coupling of the pump radiation into the first-mentioned fibre. Also, the source may further comprise one or more additional laser diode stacks with associated beam shaping optics and optical fibres, each optical fibre having an inner cladding arranged in optical communication with the inner cladding of the second optical fibre. Thus, the pump radiation from a number of laser diode stacks can be conveniently coupled into a single core-containing fibre, thus allowing the available pump power to be increased.

WO 02/50964

7

PCT/GB01/05426

The one or more optical fibre cores may comprise a plurality of cores arranged in a linear array. Multiple cores offer a good solution to the problem of power scaling, as they offer an overall large core area without the problems of multimode beams inherent in single large area cores. Also, there are thermal problems such as thermal  
5 . lensing associated with the use of single large area cores which are to a large extent overcome by using multiple smaller cores.

The plurality of cores may be substantially equally spaced along the linear array, or alternatively may be unequally spaced along the linear array. These configurations offer scope for tailoring the wavelength profile of the output of the  
10 source. Certain beam combining arrangements which may be used with the optical source use diffraction gratings which force the wavelength at which each core operates to differ with position in the linear array. Thus the cores may be positioned within the fibre to give a desired combination of output wavelengths.

Each of the plurality of cores may be configured to emit output radiation in a  
15 beam having a single spatial mode. If combining of the beams into a single output is desired, this feature allows a single mode single output beam to be readily achieved.

Sources having a plurality of cores may further comprise a beam combiner operable to combine the output radiation emitted by each of the plurality of cores into a single output beam. In such a source, each of the plurality of cores may operate at  
20 different wavelength and the beam combiner comprises a collimating lens and a diffraction grating arranged such that the output of each core is diffracted by a common angle to form a single output beam. Beam combiners of this kind are well-suited for combining beams emitted from a linear array of sources. They are also able to maintain the beam quality of the individual beams, so that an output combining a  
25 plurality of single mode beams can be near-diffraction limited.

In an alternative embodiment, the one or more optical fibre cores comprises a single core having an elongate cross-section. A core of this type does not give a single mode output, but does allow an equivalent core area to be provided in a smaller physical area than is possible with multiple cores, so that power scaling is still

WO 02/50964

PCT/GB01/05626

8

effective, and may be greater than would possible with a multiple core fibre of the same size.

The optical fibre may have an elongate cross-section with long sides which are substantially flat. A fibre of this shape allows the core or cores to be relatively close to the outside surface of the fibre, which offers improved heat removal. Flat surfaces allow good contact to be made between the fibre and a heat sink, so that heat removal may be efficient. Good dissipation of heat is important in achieving efficient performance and limiting heat-induced damage.

The optical fibre core or cores may be positioned asymmetrically with respect to the long sides of the fibre so as to facilitate removal of heat arising from absorption of the pump radiation. Any such heat can be more readily absorbed by a heat sink if the heat is generated closer to the fibre surface.

The active ions in the optical fibre core or cores may comprise at least one of: neodymium, ytterbium, erbium, thulium or other rare earth elements. For example, neodymium or ytterbium allow outputs with wavelengths around 1  $\mu\text{m}$  to be generated, erbium and ytterbium together give wavelengths around 1.5  $\mu\text{m}$ , and thulium gives wavelengths around 1.8 to 2.1  $\mu\text{m}$ . Fibres having rare earth dopants have broad gain bandwidths which can be exploited by use of diffraction-grating based beam combiners, which force multiple cores to oscillate at different wavelengths. Furthermore, in the case of multiple cores, the various cores may be doped with different active ions or combination of active ions, to give a multi-wavelength output.

The beam shaping optics may comprise a light concentrator operable receive the pump radiation from the laser diode stack and reflect the pump radiation multiple times to produce a beam of reduced dimensions. This is a simple way of achieving the desired elongate beam shape.

The multiple reflections may be achieved by the use of one or more mirrored surfaces, or alternatively by total internal reflections within a prism. The latter approach potentially offers lower loss.

WO 02/50964

PCT/CB01/05426

9

The beam shaping optics may further comprise a cylindrical lens located in front of the light concentrator and operable to focus the pump radiation as to reduce the amount of multiple reflections. This configuration also reduces losses, owing to the reduction in the amount of reflections occurring in the light concentrator.

5 Furthermore, the light concentrator may be configured such that the beam of pump radiation is produced with beam divergence angles which are substantially equal in all directions.

A second aspect of the present invention is directed to an optical system comprising two or more sources of optical radiation according to any preceding claim, and arranged so that the inner claddings in which the optical fibre cores are positioned  
10 are located side-by-side where the output radiation is emitted. This offers a way of further scaling the overall power achievable within a single system.

A third aspect of the present invention is directed to a method of generating optical radiation comprising:

15 generating pump radiation from a laser diode stack comprising one or more laser diode bars;

focusing the pump radiation into a beam with elongate cross-section; and  
coupling the pump radiation into at least one end of an optical fibre having an inner cladding of elongate cross-section so that the pump radiation passes through the  
20 inner cladding and is absorbed by one or more optical fibre cores doped with active ions and having an overall elongate cross-section arranged parallel to the elongate cross-section of the inner cladding, so as to generate and emit output radiation by stimulated emission.

Key requirements for power scaling and maintaining good beam quality in a  
25 fibre laser are:

- (a) an efficient means for in-coupling pump power from high power diode bar stacks; and/or
- (b) a fibre inner cladding geometry which allows efficient in-coupling of pump power from high power diode bar stacks and allows efficient heat removal; and/or

WO 02/50964

10

PCT/GB01/05426

(c) an arrangement of multiple active ion doped cores within an inner cladding which can efficiently absorb the pump light and which act as waveguides for the laser radiation, and which preferably should allow selection of a combined output laser beam which is of good beam quality, preferably a diffraction limited single spatial mode output beam.

The power scaling approach according to embodiments of the present invention incorporates the above features to overcome the limitations of the prior art.

An embodiment of the present invention provides a high power diode pump source comprising one or more diode bar stacks for producing high power pump radiation, a pump beam collection and beam shaping means for reducing the transverse beam dimensions of the pump beams such that the beam size in a first direction is much smaller than the beam size in a second (orthogonal) direction, a fibre of elongated cross-sectional shape said fibre having a size in a first direction which is smaller than the size in a second direction allowing efficient in-coupling of the pump radiation from said pump source, the perimeter surface in the second direction being substantially flat to allow efficient heat removal, said fibre also comprising multiple waveguiding cores of circular cross-section containing dopant ions to produce laser emission and also comprising means for combining the resultant laser beams emitted from said cores into a single beam of good beam quality.

This, and other embodiments, have many advantages over previous techniques described above in that it can be of very simple construction and allows scaling of laser power in a high quality beam, with simple thermal management. A further advantage over previous schemes for scaling fibre laser powers is that it allows the use of very high power diode bar stacks as pump sources with simple in-coupling optics, minimising complexity and greatly reducing the number of pump sources required for high power operation. This allows efficient and low cost power scaling compared to previous power scaling approaches. In addition, since the positions of the fibre cores are fixed during the fibre preform fabrication stage, they can be specified to form a linear array with very little deviation from a straight line, allowing a very simple and low cost alignment procedure to be used. The use of a linear array of laser



WO 02/50964

11

PCT/GB01/05426

ion doped cores in this invention allows efficient absorption of the launched pump radiation and facilitates the combination of the laser beams from said cores into a single, high quality, high power laser beam.

Embodiments of the present invention preferably comprise a means for  
5 combining the laser beams from each core into a single high quality beam. Preferably, a laser according to the present invention comprises a diffraction grating to enforce laser operation of each core at a slightly different wavelength than its neighbouring core, said diffraction grating also combining the beams from each core inside the laser cavity into a single, high quality beam. The cores may be doped with rare earth ions:  
10 neodymium or ytterbium to provide laser emission in the 1 $\mu$ m spectral region; erbium and ytterbium co-doping to provide laser emission the 1.5 $\mu$ m spectral region; and thulium to provide laser emission in the ~1.8 to 2.1 $\mu$ m spectral region, to meet the requirements of various applications. In addition, the cores can be placed in very close proximity (much closer than for individual single core fibres), if desired, allowing a  
15 small wavelength separation of adjacent cores to be selected for a given pitch of diffraction grating and hence the use of more cores for further power scaling. Preferably, the cores are designed so they each produce a single spatial mode beam, which is combined into a single high quality beam with beam propagation factor,  $M^2 \approx 1$ . Thus, a laser or optical source according to embodiments of this invention can  
20 provide high average power in a high brightness beam, serving the needs of many applications.

**BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS**

For a better understanding of the invention and to show how the same may be carried into effect reference is now made by way of example to the  
5 accompanying drawings in which:

Figures 1(a) and 1(b) are schematic plan and side views respectively of a diode laser bar stack for use in embodiments of the present invention, with a first arrangement of beam collection and beam shaping optics;

Figures 2(a) and 2(b) are schematic plan and side views respectively of a diode laser bar stack with a second arrangement of beam collection and beam shaping  
10 optics;

Figures 3(a) and 3(b) are schematic plan and side views respectively of a diode laser bar stack with a third arrangement of beam collection and beam shaping optics;

Figures 4(a), 4(b), 4(c), 4(d) and 4(e) are schematic end views of multi-core  
15 ribbon optical fibres with different arrangements of the cores according to different embodiments of the present invention;

Figures 5(a) and 5(b) show schematic end views of the optical fibre with different examples of outer cladding designs;

Figure 6 is a schematic end view of the optical fibre, where multiple fibres are  
20 joined or placed in close contact at one or both ends to provide a combined fibre of greater width;

Figures 7(a) and 7(b) are schematic side and plan views respectively of an embodiment of the invention;

Figure 8(a) and 8(b) are schematic side and plan views respectively of a  
25 second embodiment of the invention;

Figure 9(a) and 9(b) are schematic side and plan views respectively of a third embodiment of the invention;

Figure 10(a) and 10(b) are schematic side and plan views respectively of a fourth embodiment of the invention;

WO 02/50964

13

PCT/GB01/05426

Figure 11(a) and 11(b) are schematic side and plan views respectively of fifth embodiment of the invention;

Figure 12 is a schematic cross-sectional view through a sixth embodiment of the invention;

5 Figure 13 is a schematic view of a seventh embodiment of the invention; and  
Figure 14 is a schematic end view of a further embodiment of a ribbon fibre.

**DETAILED DESCRIPTION**

With reference to Figures 1(a) and 1(b), diode laser radiation from a high power diode bar stack 10 comprising one or more diode laser arrays (diode bars) 11 of lower power diode lasers 12 is incident on an array of cylindrical collimating lenses 13, positioned so that each cylindrical lens collimates the laser radiation from the adjacent diode bar in the fast beam divergence direction y (perpendicular to the diode laser junction), and preferably so that the height of each collimated beam is approximately equal to the distance between adjacent diode bars. Laser radiation from the diode bar stack is then incident on a light concentrator 20, with an entrance aperture 22 of width in the x-direction not less than, and preferably equal to the diode bar stack beam width in the x-direction, and width in the y-direction not less than, and preferably equal to the diode bar stack beam width in the y-direction. The light concentrator comprising highly reflecting surfaces 21 inclined at angles 23 and 24 in the x-z and y-z planes respectively, at which the laser radiation experiences multiple reflections during its passage through the concentrator (the optical path of one light ray 30 is shown by way of example only), and chosen to produce a high intensity beam of rectangular cross-section and small area at the exit aperture 26 which has a size in a first direction (x-direction) which is much larger than the size in a second direction (y-direction). In a preferred design the light concentrator is fabricated from metal with a high reflectivity metallic coating, and the angles 23 and 24, the length of the concentrator and the dimensions of the exit aperture are chosen to produce a rectangular beam at the exit aperture with roughly equal beam divergence angles in the x and y-direction, with minimal reduction in brightness.

For example, a typical diode bar stack comprising ten diode bars, each approximately 10 mm long and separated from each other by ~1.7 mm, can produce diode laser radiation with continuous wave power of 200 – 400 W and even higher pulsed powers. With the appropriate design of cylindrical lens array 13, a beam height H of approximately 1.2 mm can be used without incurring significant loss due to cross-talk (i.e. overlapping of the beams at the collimating lens). Each lens of the lens

array 13 preferably has one or both surfaces with an acylindrical profile and is carefully aligned to minimise degradation in diode laser beam quality in the y-direction due to lens aberration, whilst maximising light collection efficiency. A beam propagation factor in the y-direction,  $M_y^2 < 5$  for each collimated diode bar is easily  
 5 achievable and a beam propagation factor,  $M_y^2 = 1$  is possible with careful optimisation of lens design and alignment. The resulting combined beam from the diode stack will have a beam quality factor in the y-direction roughly given by  $M_{y,r}^2 = NsM_y^2/H$ , where  $N$  is the number of bars in the stack and  $s$  is the centre-to-centre spacing of the diode bars in the y-direction. For a typical ten bar diode stack  
 10 with cylindrical lens array for collimation in the y-direction,  $-14 < M_{y,r}^2 < 70$ .

In the orthogonal direction (x-direction) parallel to each diode bar array, the beam quality factor  $M_{x,r}^2$  for the diode stack is approximately equal to the beam quality factor  $M_x^2$  for a single diode bar. For a typical diode stack,  $M_{x,r}^2 \approx 2500$ . This large mismatch in the beam quality factors for orthogonal directions would make  
 15 focussing of the diode bar stack output to a high intensity circular beam very difficult. The large difference in the beam quality factors for orthogonal planes implies that the beam can be converted to a rectangular beam of much higher intensity than could be achieved for a circular beam. If the final beam has a beam divergence  $\theta$  (half-angle) selected so that  $\sin(\theta)$  is less than the numerical aperture of the inner cladding of the  
 20 fibre laser, as would be required for low loss guiding of the pump radiation, then the highest intensity (or smallest area) beam would have a rectangular cross-section with aspect ratio,  $W_x/W_y \approx M_{x,r}^2/M_{y,r}^2$ , where  $W_x$  and  $W_y$  are the full widths of the beam in the x- and y-directions respectively.

The performance of a cladding pumped fibre laser is determined by many  
 25 factors, including fibre losses, the launched pump power and pump absorption efficiency. The use of fibre designs which minimise the inner cladding-to-core area ratio without compromising pump launch efficiency is often crucial as this allows for the pump to be absorbed efficiently in a short length of fibre, thereby reducing cavity losses and reducing nonlinear effects which can cause self pulsing and damage to the  
 30 fibre. Thus, the properties of the diode stack pump source imply the use of a ribbon

fibre with an inner cladding or pump guide of elongate or rectangular cross-section with aspect ratio,  $w/t = W_x/W_y = M_x^2/M_y^2$ . In this way, the limitations of the high power diode stack pump source can be overcome, rendering it ideal for power scaling of fibre lasers with the appropriate rectangular inner cladding design and multiple laser ion doped cores. As an example, a fibre with inner cladding of numerical aperture 0.4 in both x-z and y-z planes, requires a pump beam with beam divergence angles in orthogonal planes,  $\theta_x = \theta_y < 0.46$  rad. If  $M_y^2 = 5$ , then as a rough guide the minimum area pump beam would have beam widths approximately given by  $W_x = 2M_x^2\lambda_p/\pi\theta_x \approx 3$  mm and  $W_y = 2M_y^2\lambda_p/\pi\theta_y \approx 63$   $\mu$ m for a pump wavelength  $\lambda_p$  of 915 nm. For efficient in-coupling of the pump radiation the fibre inner cladding would need a width in the x-direction  $w > W_x$  and a thickness in the y-direction  $t > W_y$ . For a diode stack with more bars, a fibre with inner cladding of greater thickness  $t$  would be required, but in most practical situations the inner cladding thickness  $t$  would always be much smaller than its width  $w$ . Thus, with this approach very high pump powers from diode bar stacks can be efficiently launched into fibres. In all cases, the pump light concentrator 20 is placed in close proximity to the collimating lens array 13 and is designed with entrance aperture dimensions to allow efficient collection of the pump radiation after the collimating lens array 13, and its length and inner reflecting surface inclination angles 23 and 24 are chosen to minimise losses and change in beam quality factors,  $M_x^2$  and  $M_y^2$ , to produce an elongated rectangular beam at the exit aperture 26.

In another design of pump beam collection and beam shaping optics, shown in Figures 2(a) and 2(b), and which is otherwise the same as the design of Figures 1(a) and 1(b), a cylindrical lens 15 of focal length roughly equal to, or slightly longer than, the length of the light concentrator 20 is placed after the lens array 13 and immediately before the light concentrator 20 to focus the pump beam in the y-direction. This helps to reduce reflection losses at reflecting surfaces 21 and reduces the degradation in beam quality in the y-direction for the beam emerging from the light concentrator.

In another design of pump beam collection and beam shaping optics, shown in Figures 3(a) and 3(b), the light concentrator 20 is fabricated from a transparent material (e.g. silica glass) in the form of a prism with entrance aperture 22 roughly equal to the pump beam size in the x-direction (parallel to the diode junction), and exit aperture 26 of much smaller width (typically in the range 1 mm to 3 mm), which acts to reduce the beam size in the x-direction only after multiple total internal reflections at surfaces 21. The beam size in the y-direction (perpendicular to the diode junction) is reduced by focussing with a cylindrical lens 15 of focal length designed to produce a beam waist at or just beyond the exit aperture 26. This design of pump beam reshaping and delivery optics has the attraction over the configurations shown in Figures 1(a) and 1(b) and 2(a) and 2(b) that the losses can be lower, since the diode pump light is reflected at the surfaces 21 of the concentrator 20 by total internal reflection.

Alternatively, a compound lens system could be used to appropriately focus and shape the output of the diode bar stack into a beam with the desired elongate cross-section.

The pump light 30 emerging from the light concentrator is launched into the inner cladding 40 of a multi-core ribbon fibre (preferred designs of which are shown in Figures 4(a), (b), (c), (d) and (e)) by positioning the fibre close to or just inside the exit aperture 26 of the light concentrator. In a preferred embodiment (shown in Figure 4(a)) the inner cladding has a rectangular cross-section or nearly rectangular (elongated) cross-section and contains multiple (two or more) waveguiding cores 41 doped with laser ions (for example, neodymium or ytterbium to allow laser oscillation at wavelengths around 1  $\mu\text{m}$ , erbium and ytterbium to allow laser oscillation at wavelengths around 1.5  $\mu\text{m}$ , or thulium to allow laser oscillation at wavelengths around 1.8 to 2.1  $\mu\text{m}$ ). In a preferred configuration the core diameter and its refractive index are chosen to allow selection of a single spatial mode. The cores 41 are arranged in a linear array in the x-direction (i.e. parallel to the diode bar array direction and parallel to the elongate cross-section of the inner cladding), so together they have an overall elongate cross-section. Although Figure 4(a) shows a fibre with rectangular

cross-section, in reality, surface tension in the fibre drawing process is likely to result in a fibre with slightly rounded corners, as shown in Figure 4(b). Also, although the cores shown in Figures 4(a) to 4(c) are of circular cross-section, other cross-sections may be used, such as square or rectangular. In one arrangement the cores have equal separations  $d$  and are located midway between the long faces of the inner cladding (Figures 4(a) and 4(b)). In another arrangement the cores are located much closer to one of the two long faces of the inner cladding to facilitate heat removal and minimise the temperature rise in the cores when pumped by the diode stack (Figure 4(c)). In a further arrangement, shown in Figure 4(d), the cores are located much closer together and do not span the entire width  $w$  of the ribbon fibre. This arrangement allows for efficient in-coupling of diode bar stacks, whilst reducing the lasing bandwidth for wavelength-combined cores. In a yet further arrangement (shown in Figure 4(d)) the cores 41 are arranged in a linear array but are spaced by different distances ( $d_1, d_2, d_3$ , etc), to allow the output wavelength spectrum of the laser to be tailored to a particular application which requires multiple specified wavelengths. In all designs the width  $w$  and thickness  $t$  of the inner cladding 40 are approximately equal to or slightly larger than the output beam dimensions of the light concentrator to allow pump light to be efficiently launched into the ribbon fibre. Alternatively, the pump light emerging from the light concentrator may be imaged on to the end face of the fibre by an arrangement of lenses.

The fibre also comprises an outer cladding (shown in Figure 5) of lower refractive index than the inner cladding to ensure waveguiding of the diode pump radiation in the inner cladding. In a preferred configuration the outer cladding 42 is formed from a single material and surrounds the inner cladding 40 as shown in Figure 5(a). The choice of inner cladding material should be such that the inner cladding has a high numerical aperture preferably greater than 0.4. In one configuration, shown in Figure 5(b), the outer cladding is formed from different materials (each of lower refractive index than the inner cladding) which adhere to or are placed in contact with the surfaces of the inner cladding. In a preferred configuration the inner cladding 40 is placed on a metal heat sink 43 which has been coated with a thin layer of lower



WO 02/50964

19

PCT/GB01/05416

refractive index material 42 with an additional coating of the same or a different lower refractive index materials 44 and 45 applied to the outer surface of the inner cladding. One or more of these materials may be a liquid or air.

To increase the width of the inner cladding two or more ribbon fibres each comprising a linear array of active laser ion doped cores in a rectangular or elongated inner cladding (such as those shown in Figures 4(a), (b), (c), (d) (e)) can be combined by placing one or both ends of each fibre in contact with the others. Figure 6 shows, by way of example only, three fibres arranged in this manner. This allows further power scaling of the combined fibre lasers by increasing the number of lasing cores and allows additional or higher power diode bar stacks to be launched into the inner cladding of the fibres. It also allows any restrictions on the aspect ratio w/h for a single fibre due to fabrication limitations to be overcome.

Figures 7(a) and 7(b) show schematic side and plan views respectively of a preferred embodiment of this invention for achieving simultaneous laser operation of each of the laser ion doped cores. Pump radiation from a high power diode bar stack 10 is collected and reshaped into an intense elongated rectangular beam in the manner already described and is launched into the inner cladding of a multi-core ribbon fibre 40. In Figures 7(a) and 7(b) the fibre has five cores, by way of example only. In practice, the choice of the number of cores will depend on many factors including the inner cladding and core sizes, the spectroscopic properties of the lasing ion, the diode bar stack's wavelength and the intended fibre laser output power. Mirror 50 is selected to have high reflectivity at the lasing wavelengths and high transmission at the pump wavelength and is butted to the pump in-coupling end of the fibre to provide the feedback necessary for efficient laser operation. Alternatively, mirror 50 can be replaced by multilayer dielectric coating with high reflectivity for the lasing wavelengths and high transmission for the pump wavelength placed directly on the pump in-coupling end of the fibre, or by in-fibre Bragg gratings written in each of the fibre's cores to provide the required reflectivity characteristics at the lasing and pump wavelengths. A further alternative, for use with the prism light concentrator for Figures 3(a) and 3(b), is to provide a coating, such as a dielectric coating, on the end

surface of the prism, and to butt the fibre end up against the coating. The coating is highly transmitting at the pump wavelength, and highly reflecting at the lasing wavelengths to provide the feedback necessary for operation. An advantage of this is that the fibre may be moved to a new part of the prism surface in the event of damage to the coating.

The fibre is also preferably placed on a heat sink 43, which may be liquid cooled, for removal of the heat generated during the laser pumping cycle. The elongated rectangular geometry of the fibre allows for easy heat sinking and hence effective heat removal, this being another advantage of the present invention over the prior art. The length of the fibre is preferably chosen to ensure efficient absorption of the pump radiation from the diode stack and efficient laser operation on each of the lasing cores. The laser output face 46 of the fibre is prepared (e.g. by polishing) to provide the further feedback required for laser oscillation. If required, an increase in feedback (i.e. reflectivity of the fibre end) may be achieved by applying a multilayer dielectric coating to the end face with the desired reflectivity characteristics, or by writing Bragg gratings in the cores of the fibre. This embodiment (shown in Figures 7(a) and 7(b)) of the invention provides a means for producing high laser output power in multiple laser beams 60. The beam quality factor  $M_{cx}^2$  of the combined output beam in the x-direction is roughly given by  $M_{cx}^2 \approx qdM_{cx}^2/\phi_c$  where  $q$  is the number of cores,  $d$  is the centre-to-centre spacing of the cores,  $\phi_c$  is the core diameter and  $M_{cx}^2$  is the beam quality factor of the laser beam from a single core. In the orthogonal plane (i.e. perpendicular to the fibre array), the beam quality factor  $M_{cy}^2$  for the combined beam is approximately the same as that for a single beam (i.e.  $M_{cy}^2 \approx M_{cy}^2$ ). In a preferred embodiment each core is designed to produce a single spatial mode beam, under which circumstances  $M_{cx}^2 \approx M_{cy}^2 \approx 1$ . The beam quality in the x-direction can be improved by a factor  $\sim d/\phi_c$  by using an array of collimating lenses positioned immediately after the fibre to simultaneously collimate each beam from the array of lasing cores.

In another preferred embodiment of the invention (shown in Figures 8(a) and 8(b)) the fibre laser also incorporates a means for combining the beams from individual

WO 02/50964

21

PCT/GB01/05426

fibre lasers into a single high quality beam. This is achieved by simply adding an external cavity comprising a collimating lens 52, a diffraction grating 53 and an output coupling mirror 55 with partial transmittance at the lasing wavelengths. The collimating lens 52 is preferably antireflection coated at the lasing wavelengths and is positioned at a distance approximately equal to its focal length from the end face 46 of the fibre. Alternatively, the collimating lens 52 could be replaced with alternative collimating arrangements, such as a compound lens comprising a plurality of lenses. This arrangement can be used to reduce aberration. The diffraction grating 53 is preferably blazed to give high reflectivity over the range of lasing wavelengths into the first order diffracted beam and is positioned at a distance approximately equal to the focal length of the collimating lens 52 from the lens as shown. The diffraction grating is preferably aligned so that the laser radiation from each core is diffracted into the -1 first order beam with the smallest possible angle between the incident and diffracted beam which allows the combined diffracted laser beam to pass by the side of lens 52 and its holder without attenuation. The partially transmitting mirror 55 is preferably aligned to retroreflect the combined first order diffracted beam, thereby providing the feedback required for laser action in each of the cores.

The principle of operation of the fibre laser is as follows: Each lasing core operates independently of the other cores using the extended cavity to provide the feedback for laser oscillation in each core and with each laser providing an output from the partially transmitting mirror 55. The orientation of the output coupler 55 with respect to the diffraction grating 53 defines a common angle of incidence  $\theta_i$  on the diffraction grating for all laser beams fed back from the output coupler. The action of the diffraction grating is to automatically select the wavelength of each lasing core so that each of the laser beams fed back by the output coupler 55 is diffracted at the diffraction grating 53 with slightly different angles  $\theta_{d_j}$  with respect to the normal, and hence is focussed by lens 55 into the corresponding core, thereby completing the feedback loop required for laser operation. As a rough guide the lasing wavelength  $\lambda_j$  of the  $j$ th core is given by  $\lambda_j = \Lambda[\sin(\theta_i) + \sin(\theta_{d_j})]$ , where  $\Lambda$  is the line spacing on the diffraction grating. Thus, the wavelength separation  $\Delta\lambda$  of adjacent lasing cores is

approximately given by  $\Delta\lambda = \lambda(\sin(\theta_0) - \sin(\theta_{0-1})) = \lambda d \cos(\theta_0) / f$  (providing  $d/f \ll 1$ ), where  $f$  is the focal length of lens 52,  $\theta_0$  is the average diffraction angle and  $d$  is the centre-to-centre separation of adjacent lasing cores (as shown for example in Figures 4(a), (b) and (c)). Thus by careful selection of the fibre design, core spacing, collimating lens diameter and focal length, and diffraction grating size and line spacing it is possible to select the wavelength separation of adjacent cores to be much smaller than the gain bandwidth for the laser transition  $\Delta\lambda_L$ . The maximum number of cores allowable roughly scales according to  $\Delta\lambda_L / \Delta\lambda$  and with standard components can be made to be greater than 100, if required. In a preferred configuration the fibre end face 46 is prepared so as to suppress feedback which might otherwise compete with the feedback due to the external cavity thereby limiting the effective linewidth over which the external cavity can act to select the cores' wavelengths. This may be achieved by, for example, coating the fibre end face 46 with an antireflection coating at the lasing wavelengths, or by angle polishing the end face 46, or by optically contacting a glass block (preferably with the same refractive index as the core) on to the end face 46 of the fibre. The cores' waveguiding properties are preferably selected so that each core provides only a single spatial mode beam, with the result that the combined output beam 61 is nearly diffraction limited with very good beam quality. The cores can be doped with different active laser ions to allow laser oscillation in different wavelength regimes. For example, neodymium or ytterbium ions can be used to provide lasing wavelengths in the  $\sim 1 \mu\text{m}$  regime, co-doping with both erbium and ytterbium ions can be used to provide lasing wavelengths in the  $1.5 \mu\text{m}$  regime, and thulium ions can be used to provide lasing wavelengths in the  $1.8$  to  $2.1 \mu\text{m}$  regime, thereby serving a number of different applications. Additionally, other rare earth ions can be used alone or in co-doped combinations to give other wavelengths, as desired. Indeed, different individual cores within the fibre may be doped with different active ions, to give a multi-wavelength source.

In an alternative configuration the cores separations can be tailored to select laser operation on a number of specific wavelengths combined into a single high

power laser beam (for example by using the fibre design shown schematically in Figure 4(e)) as required by a particular application (e.g. pumping of a solid state laser). In summary, this approach for power scaling which combines the ability to in-couple high pump powers from diode bar stacks into a ribbon fibre with highly elongated rectangular inner cladding with a novel linear multicore array and means for intracavity wavelength combining the laser beams from each core, exploiting the broad gain linewidths that are typical of in glass hosts to increase the combined core area, allows very high output powers ( $> 1 \text{ kW}$ ) to be obtained in a single high quality laser beam. Furthermore, the highly elongated rectangular fibre geometry allows for relatively easy heat sinking and hence effective removal of the unwanted heat generated as part of the lasing pumping cycle.

In another preferred embodiment, shown in Figures 9(a) and (b), the fibre laser can be operated in pulsed (Q-switched) mode to achieve a combination of high peak power and high average power by inserting a Q-switch 58 into the external cavity between the diffraction grating 53 and the output coupler 55.

In another preferred embodiment, shown in Figures 10(a) and 10(b), wavelength combining of the multiple cores' output beams is achieved external to the laser cavity. In this case, the feedback for laser oscillation for each core is achieved by in-fibre Bragg gratings at one or both ends of the fibre and with grating period selected to produce wavelength dependent feedback at the desired wavelength. Additional feedback for laser oscillation (if required) being provided by a mirror or a coated or uncoated perpendicularly polished fibre end face 46. The operating wavelengths of the individual cores are selected according to the expression,  $\lambda_i = \Lambda(\sin(\theta_{i1}) + \sin(\theta_{i2}))$ , so that when the beams are collimated by a lens 52 of focal length  $f$ , placed at a distance approximately equal to  $f$  from the fibre output end, and incident at angles  $\theta_{i1}$  on a diffraction grating 53 of line spacing  $\Lambda$  placed at a distance approximately equal to  $f$  from the lens 52, they are diffracted from the diffraction grating at a common angle  $\theta_0$  forming a single laser beam 61 of high quality. Preferably, the cores are each designed to produce a single spatial mode output beam, with the result that the combined laser beam 61 is nearly diffraction limited.

Other approaches may be used to combine the beams emitted by the individual cores, as alternatives to the spectral beam combining methods already described. For example, the cores may be configured to each emit at the same wavelength, and an external phase-locking arrangement may be provided to phase-lock these single frequency outputs into a single coherent beam. This is relatively complex to achieve, but offers the advantage that control of the phase in this way allows the beam to be directed.

Alternatively, phase-locking may be achieved internally, by allowing a certain amount of cross-talk to occur between the fibre cores.

10 The power scaling approach according to embodiments of the present invention as described in Figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 and 10 can be simply extended to allow pumping by more than one diode bar stack. In one preferred embodiment (shown in Figures 11(a) and 11(b)) multiple diode stack pumped fibres (three in this example), each comprising a single diode stack with beam collection and reshaping means 25 and ribbon fibre with elongated rectangular inner cladding containing a linear array of cores 40, are combined into a single beam 61 by positioning the fibre ends 46 adjacent to each other so that their cores form a longer linear array (for example, as shown in Figure 6). The output beams from said cores can be combined into a single high quality beam via the use of an external cavity containing a collimating lens 52, a diffraction grating 53 and partially transmitting output coupling mirror 55. As before, the action of the external feedback cavity is to enforce each core to operate at a slightly different wavelength within the gain bandwidth of the active ion so that the resulting beams are combined intracavity at the diffraction grating to form a single output beam 61 of high quality. To suppress feedback from the fibre ends 46 and to hence maximise the number of fibre lasers which can be combined in this way, the fibre end faces should preferably be antireflection coated, angle polished or placed in optical contact with a polished glass block. High peak power pulsed operation of the combined laser source may also be achieved, if desired, by inserting a Q-switch in the external cavity between the diffraction grating 53 and the output coupling mirror 55.

Alternatively, multiple diode bar stack pump sources can be coupled into a single fibre via the approach illustrated in Figure 12. In this case single diode bar stacks are launched via the schemes shown in Figures 1(a) and 1(b), or 2(a) and 2(b) or 3(a) and 3(b), into ribbon fibres 48 with elongated rectangular pump guides and no cores, and these fibres are then placed in optical contact with ribbon fibres 40 containing a linear array of laser ion doped cores. In one preferred arrangement, shown in Figure 12, the ribbon fibre with cores is wrapped around a metal heat sink coated with a low refractive index cladding material 42 and the coreless pump delivery fibres 48 are wound around on top of the ribbon fibre 40 with cores. A further protective low refractive index cladding layer 42 may then be wound around on top of the pump delivery fibres 48. The inner cladding of fibre 40 should preferably be fabricated from a material with refractive index,  $n_c$ , and the pump delivery fibre 48 fabricated from a material with refractive index  $n_p$ , where  $n_c \geq n_p$ . In a preferred design both the inner cladding of fibre 40 and the pump fibre 48 are fabricated from silica.

The outer cladding layer 42 should be fabricated from a material with lower refractive index than  $n_c$  and  $n_p$ . In this design pump radiation is passed from the pump delivery fibre 48 into multiple core ribbon fibre 40 at the regions where the two fibres are in optical contact and hence pump radiation can be absorbed by the laser gain media in the cores. The large flat surfaces of fibres 48 and 40 allow for a large area of optical contact and hence efficient pump absorption in the multiple core ribbon fibre. In addition, the large flat surfaces of ribbon fibre 40 allow easy heat sinking and hence effective removal of unwanted heat generated within the cores. This approach allows the in-coupling of multiple diode bar stacks into the multiple core ribbon fibre, and via the use of an external cavity (as shown in Figures 8 and 9) allows very high continuous wave or pulsed powers in a single high quality beam to be achieved.

The various embodiments of the laser described herein above may be adapted for use as amplifiers. The requirement for this is that both the pump light from the diode stack and an optical signal to be amplified need to be coupled into the ribbon fibre. The embodiment of Figure 12 is well-suited for this, as the ends of the ribbon fibres 40 with the active ion doped cores 41 are free, owing to the use of the additional

core-less ribbon fibres 48 to receive the pump light from the diode stack. Hence, the signal to be amplified can be launched directly into an end of the ribbon fibre 49 with cores 41, using suitable coupling optics.

5 The embodiment of Figures 7(a) and 7(b) can also be used as an amplifier. In this case, because one end of the ribbon fibre 40 receives the pump light directly, the signal is most readily launched into the fibre 40 from its other end, being the end which emits the laser output in the laser embodiment.

Figure 13 shows a simplified schematic diagram of such an amplifier. The pump light 100 in form of a beam having an elongate cross-section, is generated from a pump source 102, which comprises a diode bar stack and light concentrating optics as described above. The pump light is launched into a ribbon fibre 40 having one or more cores, also as described above.

15 A mirror 104 is provided between the pump source 102 and the fibre 40, which is highly transmitting at the pump wavelength and highly reflecting at the signal wavelength. Alternatively, the mirror 104 can be replaced with a dielectric coating on the fibre end or the end surface of any prism used to concentrate the pump light, or by gratings written into the fibre, all as described above for the laser embodiments.

The signal is launched into the far end of the fibre 40 via a beam splitter 106, which directs part of the signal beam 108 into the fibre. Suitable beam shaping optics (not shown) are used to focus the signal beam to achieve efficient coupling.

20 In operation, the signal propagates along the fibre 40, and is amplified by the gain produced in the fibre cores by the pump light. On reaching the mirror 102, the amplified signal is reflected back down the fibre 40, and exits through the fibre end through which it was originally launched. The final amplified signal 110 is coupled out of the amplifier system through the beam splitter 106.

25 The amplified output of the amplifier may be combined into a single beam if desired. A beam combining method utilising an external phase-locking arrangement is well-suited, as it is likely that each of the cores will be operating at the same signal wavelength.



With both the laser and amplifier embodiments of the invention, a further embodiment of the ribbon fibre 40 may be used.

Figure 14 shows a cross-sectional view of this embodiment of the fibre 40. In common with the earlier-described embodiments, the inner cladding 120 has a substantially rectangular, elongate cross-section, configured to efficiently receive pump light from a diode bar stack which is focussed into a beam of elongate cross-section. However, this fibre has a single core 122, also of elongate cross-section.

A core of this shape will not produce a single spatial mode output. However, the smaller core dimension can be chosen to be small enough for the output beam to be single mode in that dimension, while the longer dimension will be multimode. Hence, this type of fibre is not suitable for use with the spectral beam combiner described above, nor is it suitable if a single mode output is required. However, it still offers the power scaling advantages of the other embodiments, as the core area can be at least as big as the total core area of a plurality of individual cores. Indeed, the same core area can be provided in a smaller physical area, as the spacing needed between individual cores is not present. This may be advantageous in addressing any fibre fabrication limitations on the overall size of the fibre.

In summary, aspects of the present invention provide a laser system comprising one or more diode bar stack pump lasers, a means for efficiently incoupling the pump radiation from said diode bar stacks into a ribbon fibre with a highly elongated rectangular inner cladding, said fibre further comprising a linear array of two or more waveguiding cores doped with active laser ions to provide gain for a range of lasing wavelengths, said laser system also comprising a means for combining the emitted laser beams from each lasing core into a single output beam with high power and good beam quality.

**REFERENCES**

- [1] C. Stewen, M. Larionov, A. Giesen and K. Contag, "Yb:YAG thin disk laser with 1kW output power," in Trends in Optics and Photonics, vol.34, (Optical Society of America, Washington, D.C.) (2000), p.35-41.
- [2] A. K. Cousins, "Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped solid-state laser rods," IEEE J. Quantum Electron., vol.28, (1992), p.1057-1069.
- [3] R. A. Hayward, W. A. Clarkson, P. W. Turner, J. Nilsson, A. B. Grudinin and D. C. Hanna, "Efficient cladding-pumped Tm-doped silica fibre laser with high power single-mode output at 2µm," Electron. Lett., vol.36, (2000), 711-712.
- [4] V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts, S. Sanders, S. Bicknese, R. Dohle, E. Wolak, P. S. Yeh and E. Zucker, "110W fibre laser," Electron. Lett., vol.35, (1999), p.1158-1160.
- [5] C. C. Cook and T. Y. Fan, "Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity," in Trends in Optics and Photonics, vol.26, (Optical Society of America, Washington, D.C.), (1999), p.163-166.
- [6] V. Dancau, A. Sanchez, T.Y. Fan, H.K. Choi, G.W. Turner and C.C. Cook, "Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity", Opt. Lett., vol. 25, (2000), p. 405-407.
- [7] EP-A-1 059 707

**CLAIMS**

1. A source of optical radiation comprising:  
a laser diode stack comprising one or more laser diode bars and operable to  
5 emit pump radiation;  
beam shaping optics operable to focus the pump radiation into a beam with  
elongate cross-section;  
an optical fibre having an inner cladding of elongate cross-section and  
arranged so that the beam of pump light is coupled into at least one of its ends; and  
10 one or more optical fibre cores doped with active ions and having an overall  
elongate cross-section arranged parallel to the elongate cross-section of the inner  
cladding, and arranged to absorb the pump radiation via the inner cladding so as to  
generate and emit output radiation by stimulated emission.
- 15 2. A source of optical radiation according to claim 1, in which the stimulated  
emission produces laser action, the optical fibre core or cores being arranged within  
an optical cavity operable to provide optical feedback of the output radiation.
3. A source of optical radiation according to claim 1, in which the stimulated  
20 emission produces optical amplification, the optical fibre core or cores being arranged  
to receive signal radiation to be amplified by gain arising from absorption of the pump  
radiation.
4. A source of optical radiation according to any one of claims 1 to 3, in which  
25 the one or more optical fibre cores are positioned within the inner cladding of the  
optical fibre.
5. A source of optical radiation according to claim 4, and further comprising one  
or more additional optical fibres arranged side-by-side with the first-mentioned optical

WO 02/50964

30

PCT/GB01/05426

fibre such that pump light is additionally coupled into inner cladding of the additional fibre or fibres.

6. A source of optical radiation according to any one of claims 1 to 3, in which  
5 the one or more optical fibre cores are positioned within an inner cladding of a second optical fibre arranged in optical communication with the inner cladding of the first-mentioned optical fibre.

7. A source of optical radiation according to claim 6, and further comprising one  
10 or more additional laser diode stacks with associated beam shaping optics and optical fibres, each optical fibre having an inner cladding arranged in optical communication with the inner cladding of the second optical fibre.

8. A source of optical radiation according to any one of claims 1 to 7, in which  
15 the one or more optical fibre cores comprises a plurality of cores arranged in a linear array.

9. A source of optical radiation according to claim 8, in which the plurality of  
cores are substantially equally spaced along the linear array.

20 10. A source of optical radiation according to claim 8, in which the plurality of cores are unequally spaced along the linear array.

11. A source of optical radiation according to any one of claims 8 to 10, in which  
25 each of the plurality of cores is configured to emit output radiation in a beam having a single spatial mode.

12. A source of optical radiation according to any one of claims 8 to 11, and  
30 further comprising a beam combiner operable to combine the output radiation emitted by each of the plurality of cores into a single output beam.

13. A source of optical radiation according to claim 12, in which each of the plurality of cores operates at a different wavelength and the beam combiner comprises a collimating lens and a diffraction grating arranged such that the output of each core is diffracted by a common angle to form a single output beam.
14. A source of optical radiation according to any one of claims 1 to 7, in which the one or more optical fibre cores comprises a single core having an elongate cross-section.
15. A source of optical radiation according to any preceding claim, in which the optical fibre has an elongate cross-section with long sides which are substantially flat.
16. A source of optical radiation according to claim 15, in which the optical fibre core or cores is/are positioned asymmetrically with respect to the long sides of the fibre so as to facilitate removal of heat arising from absorption of the pump radiation.
17. A source of optical radiation according to any preceding claim, in which the active ions in the optical fibre core or cores comprise at least one of: neodymium, ytterbium, erbium, thulium, or other rare earth elements.
18. A source of optical radiation according to any preceding claim, in which the beam shaping optics comprises a light concentrator operable receive the pump radiation from the laser diode stack and reflect the pump radiation multiple times to produce a beam of reduced dimensions.
19. A source of optical radiation according to claim 18, in which the multiple reflections are achieved by the use of one or more mirrored surfaces.

20. A source of optical radiation according to claim 18, in which the multiple reflections are achieved by internal reflections within a prism.
21. A source of optical radiation according to any one of claims 18 to 20, in which  
5 the beam shaping optics further comprises a cylindrical lens located in front of the light concentrator and operable to focus the pump radiation as to reduce the amount of multiple reflections.
22. A source of optical radiation according to any one of claims 18 to 21, in which  
10 the light concentrator is configured such that the beam of pump radiation is produced with beam divergence angles which are substantially equal in all directions.
23. An optical system comprising two or more sources of optical radiation according to any preceding claim, and arranged so that the inner claddings in which  
15 the optical fibre cores are positioned are located side-by-side where the output radiation is emitted.
24. A method of generating optical radiation comprising:  
generating pump radiation from a laser diode stack comprising one or more  
20 laser diode bars;  
focusing the pump radiation into a beam with elongate cross-section; and  
coupling the pump radiation into at least one end of an optical fibre having an inner cladding of elongate cross-section so that the pump radiation passes through the inner cladding and is absorbed by one or more optical fibre cores doped with active  
25 ions and having an overall elongate cross-section arranged parallel to the elongate cross-section of the inner cladding, so as to generate and emit output radiation by stimulated emission.

WO 02/50964

1/14

PCT/GB01/05626

Figure 1(a)

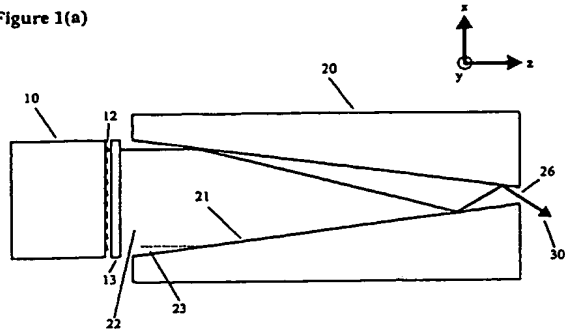


Figure 1(b)

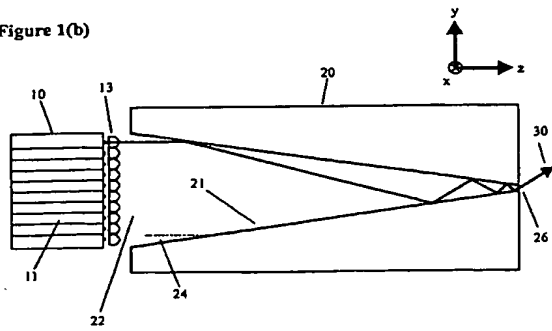


Figure 2(a)

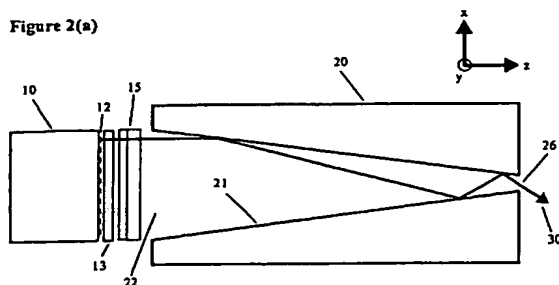
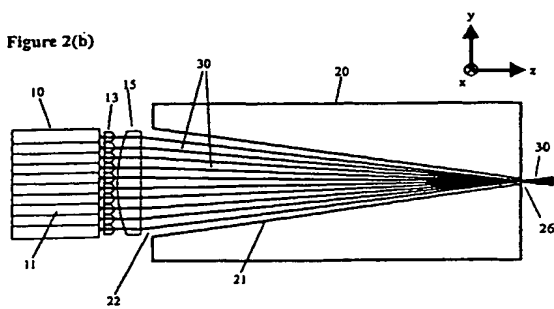


Figure 2(b)





WO 02/50964

3/14

PCT/GB01/05626

Figure 3(a)

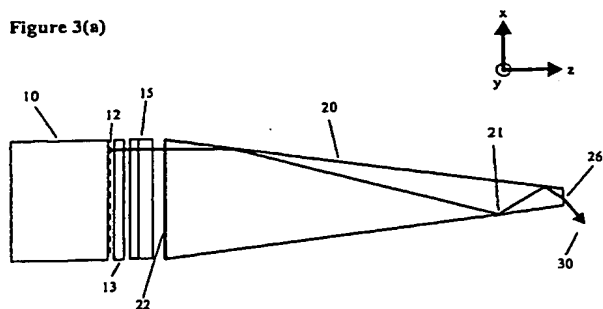


Figure 3(b)

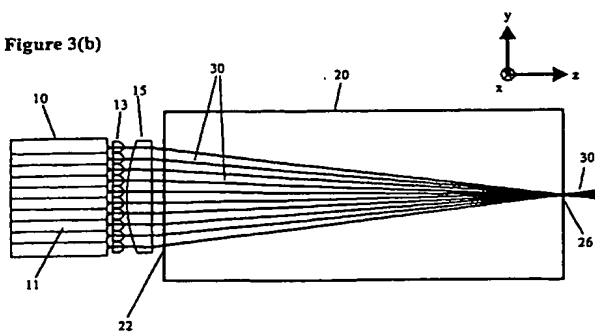


Figure 4(a)

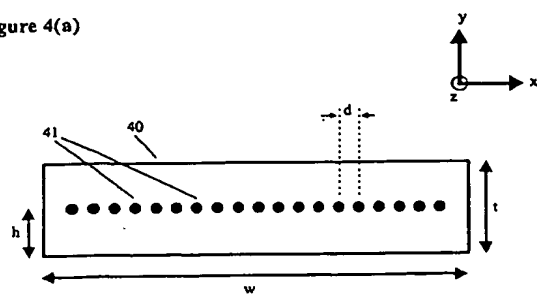
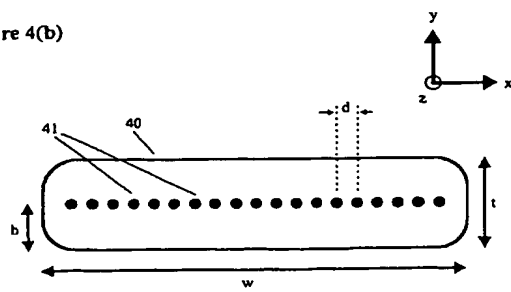


Figure 4(b)



WO 02/50964

5/14

PCT/GB01/05626

Figure 4(c)

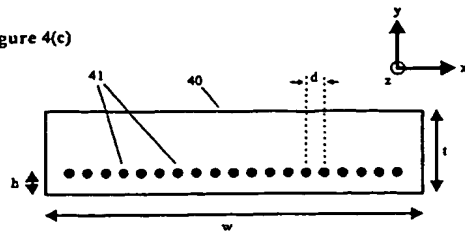


Figure 4(d)

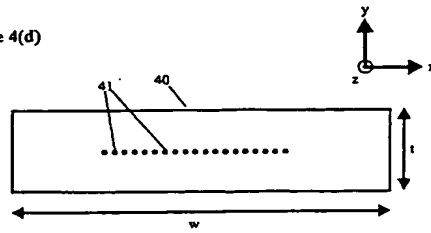


Figure 4(e)

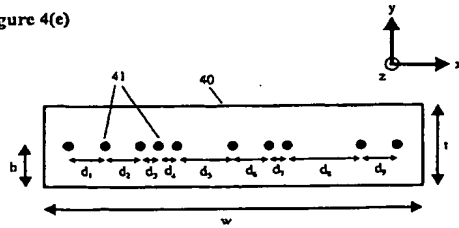


Figure 5(a)

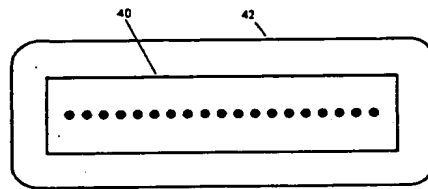


Figure 5(b)

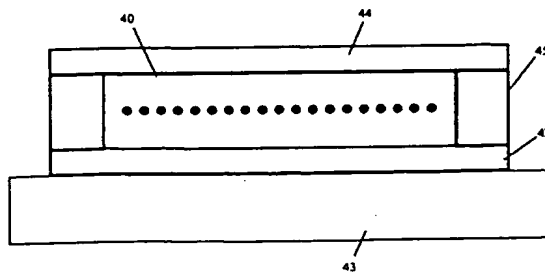
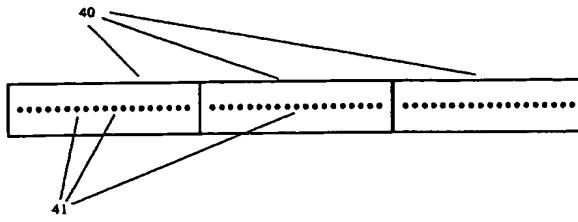


Figure 6



WO 02/50964

8/14

PCT/GB01/05626

Figure 7(a)

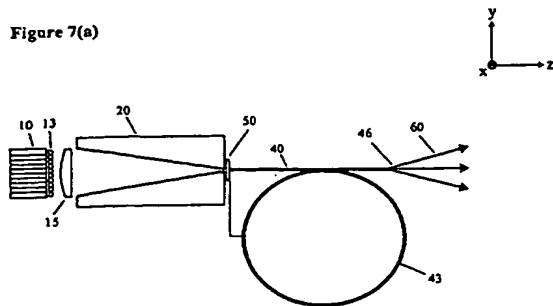
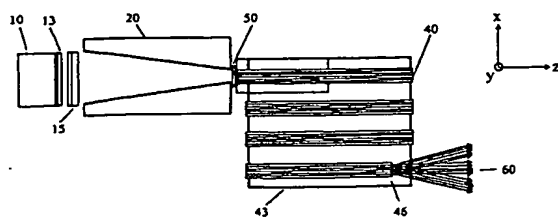


Figure 7(b)



WO 02/50964

9/14

PCT/GB01/05626

Figure 8(a)

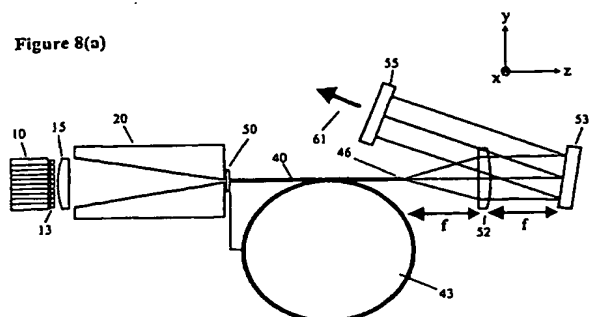
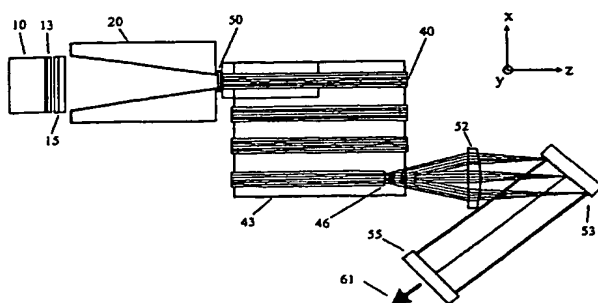


Figure 8(b)



WO 02/50964

10/14

PCT/GB01/05426

Figure 9(a)

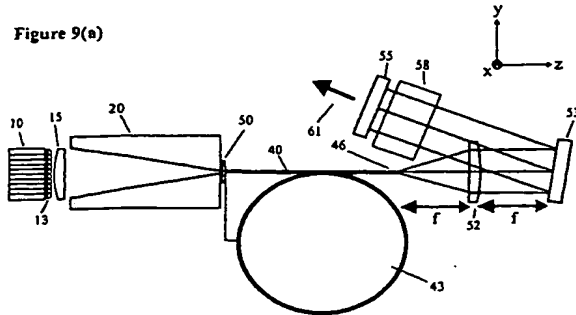
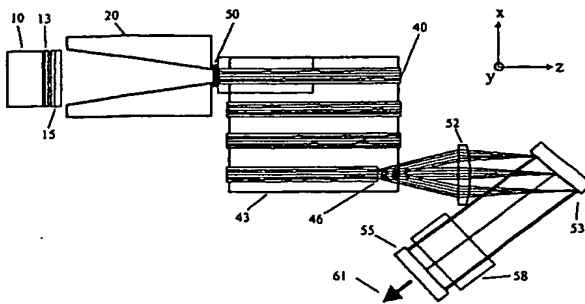


Figure 9(b)





WO 02/50964

11/14

PCT/GB01/05626

Figure 10(a)

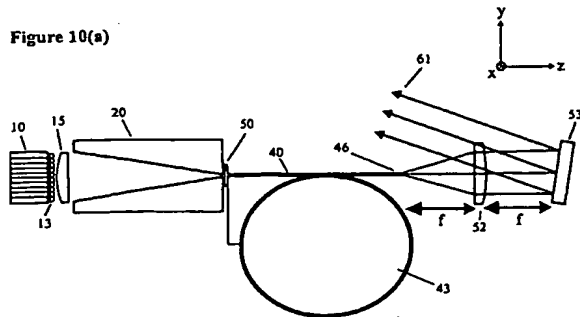
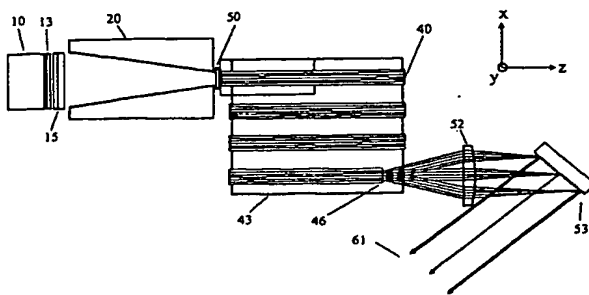


Figure 10(b)



WO 02/50964

12/14

PCT/GB01/05426

Figure 11(a)

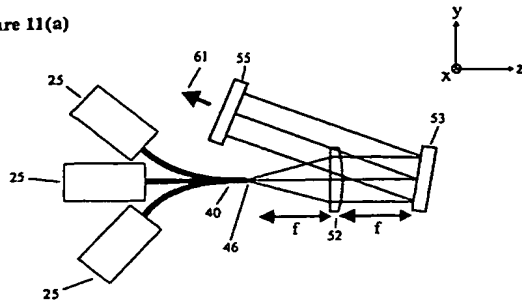
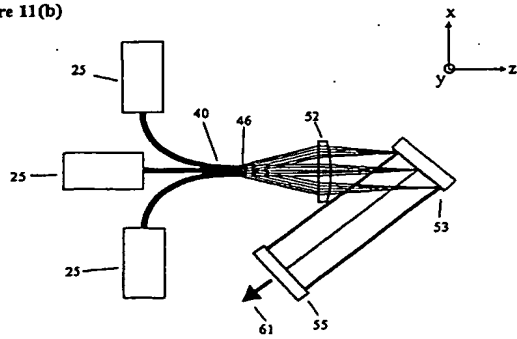


Figure 11(b)

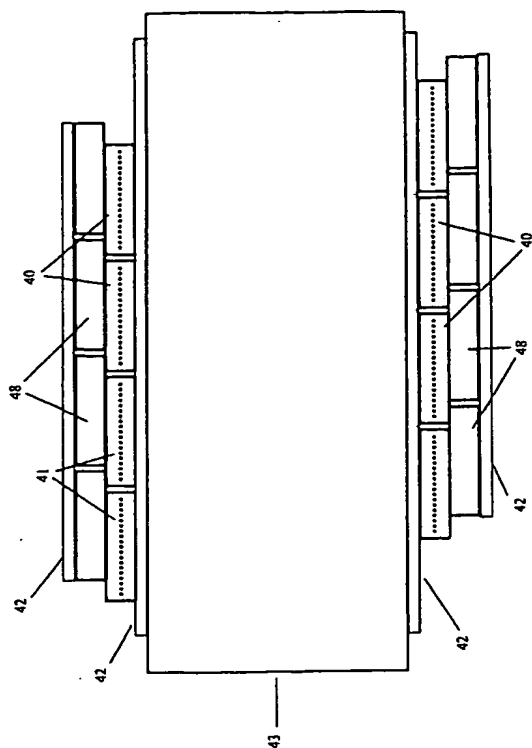


WO 02/50964

13/74

PCT/GB91/05426

Figure 12



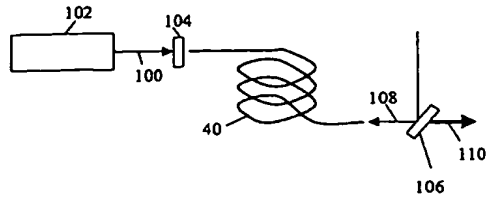


Figure 13

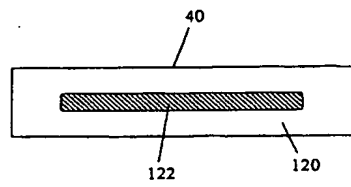


Figure 14

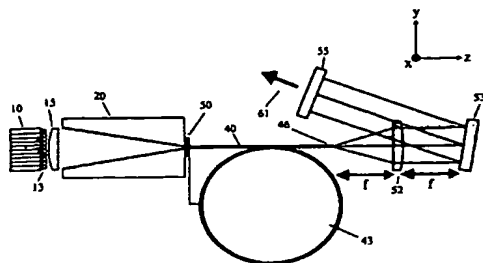
## (12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)



**PCT**

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 1040 1

- (54) Title: FIBRE LASER



(57) Abstract: A three-beamed optical source comprises a high power laser diode stack as a pump source, the output of which is channeled into an intense beam of elongate cross-section by use of focusing and light concentrating elements. The beam is used to excite a cladding pump beam having an inner cladding also with elongate cross-section, to provide high efficiency pumping. To achieve high output powers with a good mode quality, an overall large core area is provided by configuring the core to have a plurality of individual cores doped with active ions and arranged within the inner cladding in a linear array. Each individual core is configured for single mode operation, so that a plurality of single mode beams outputs are generated, which can be combined to produce one single mode high power output. The source may also be configured as a laser or as an amplifier.

**WO 02/050964 A3**

WO 02/050964 A3

GB, GR, IL, IT, LJ, MC, NL, PT, SI, TR, GA, PA, PH, RU, CZ, CN, GA, IN, IQ, GW, MI, MR, NI, SN, TD, TG).

(83) Date of publication of the international search report:  
4 September 2003

Published:  
— with international search report

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

## 【国際調査報告】

| INTERNATIONAL SEARCH REPORT   |  | Doc. No. Application No.<br>PCT/GB 01/05626                      |
|---|--|--|
| A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER<br>IPC 7 H01S3/0941 H01S3/094   |  |  |
| According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC   |  |  |
| B. FIELDS SEARCHED<br>Internally designated searched (classification systems followed by classification symbols)<br>IPC 7 H01S  |  |  |
| Externally designated searched other than internally designated in the extent that such documents are included in the fields searched   |  |  |
| Electronic data bases consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)<br>EPO-Internal   |  |  |
| C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT  |  |  |
| Category *  | Citation of document, with indications, where appropriate, of the relevant passages                          | Relevant to claim No.  |
| X   | US 5 268 978 A (FANTONE STEPHEN D ET AL)<br>7 December 1993 (1993-12-07)<br>column 5, line 1-20; figures 1-7 | 1-4, 14,<br>15, 17, 24<br>5-7, 16,<br>18, 23                     |
| A   | column 5, line 56 - column 6, line 7   |  |
| X   | WO 93 15536 A (AMCO CORP)<br>5 August 1993 (1993-08-05)<br>page 7, line 15-30; figure 2C                     | 1-5,<br>18-24  |
| A   | US 4 820 010 A (WORLD D PHILLIP ET AL)<br>11 April 1989 (1989-04-11)<br>figures 2,4                          | 1, 24  |
| A   | US 5 859 868 A (ARAI MOTOHIRO ET AL)<br>12 January 1999 (1999-01-12)<br>figure 16                            | 1, 18-20   |
|   | -/-  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of this C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.  |  |  |
| * Special categorization of cited documents:<br>"A" document defining the general state of the art which is not<br>considered to be a particular reference<br>"E" earlier document not published on or after the international<br>filing date<br>"L" document which may have double or priority claims or<br>which is cited to establish the publication date of another<br>document or other specific feature (the applicant)<br>"O" document relating to an oral disclosure, use, exhibition or<br>other means<br>"P" document published prior to the international filing date but<br>later than the priority date claimed<br>"T" prior document published after the international filing date<br>or priority date and not in conflict with the application but<br>cited to understand the principles or theory underlying the<br>invention<br>"X" document of particular relevance: the claimed invention<br>appears to be anticipated or covered by the document or to<br>be on a inventive step when the document is taken alone<br>"Y" document of particular relevance: the claimed invention<br>cannot be distinguished by inventive step when the<br>document is combined with one or more other cited docu-<br>ments, such combination being pertinent to a person skilled<br>in the art<br>"Z" document prior art of the same patent family |  |  |
| Date of the actual completion of the international search<br>9 April 2003   |  | Date of mailing of the international search report<br>16/04/2003 |
| Name and mailing address of the ISA<br>European Patent Office, P.O. Box 5418 Postfach 5<br>8001 München 51, Germany<br>Tel. (+49-89) 244-4040, Telex 51 601 epc ml<br>Fax (+49-89) 244-4040   |  | Authorized officer<br>Claesson, L                                |

Form PCT/ISN/10 (latest issue) (July 1999)

| INTERNATIONAL SEARCH REPORT                          |  | Int. of Application No.<br>PCT/68 01/05626 |
|--|--|--|
| C (CONTINUATION) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT |  |  |
| Category   | Category of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages   | Relevant to claim No.                      |
| A  | US 5 084 882 A (HUGHES JOHN L)<br>28 January 1992 (1992-01-28)<br>figures 1-5  | 1-24                                       |
| A  | FU R ET AL: "DESIGN OF EFFICIENT LENS<br>DUCTS"<br>APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF<br>AMERICA, WASHINGTON, US,<br>vol. 37, no. 18,<br>20 June 1998 (1998-06-20), pages<br>4000-4003, XP000766641<br>ISSN: 0003-6935<br>the whole document | 1,18,24                                    |
| A  | US 5 369 661 A (YAMAGUCHI SATOSHI ET AL)<br>29 November 1994 (1994-11-29)<br>the whole document  | 1-24                                       |
| A  | EP 1 059 707 A (TRW INC)<br>13 December 2000 (2000-12-13)<br>cited in the application<br>the whole document  | 1,24                                       |

Form PCT/ISA/210 (continuation of Form PCT/ISA/210) (July 1992)



INTERNATIONAL SEARCH REPORT  
Information on patent family members

Int. Application No.  
PCT/GB 01/05626

| Patent document<br>cited in search report | Publication<br>date | Patent family<br>member(s) | Publication<br>date  |
|---|---------------------|----------------------------|--|
| US 5268978                                | A                   | 07-12-1993                 | CA 2127288 C 09-01-1996<br>DE 69316878 D1 12-03-1998<br>DE 69316878 T2 28-05-1998<br>EP 0627091 A1 07-12-1994<br>JP 2657117 B2 24-09-1997<br>JP 7504049 T 27-04-1995<br>WO 9415234 A1 07-07-1994 |
| WO 9315536                                | A                   | 05-08-1993                 | WO 9315536 A1 05-08-1993   |
| US 4820010                                | A                   | 11-04-1989                 | US 4763975 A 16-08-1988<br>US 4818062 A 04-04-1989<br>US RE33722 E 22-10-1991  |
| US 5859868                                | A                   | 12-01-1999                 | JP 2988354 B2 13-12-1999<br>JP 9199774 A 31-07-1997<br>DE 19702146 A1 24-07-1997<br>KR 271046 B1 01-12-2000  |
| US 5084882                                | A                   | 28-01-1992                 | AU 3965589 A 23-01-1990<br>WO 9000320 A1 11-01-1990<br>EP 0393163 A1 24-10-1990  |
| US 5369661                                | A                   | 29-11-1994                 | JP 4255280 A 10-09-1992  |
| EP 1059707                                | A                   | 13-12-2000                 | US 6229939 B1 08-05-2001<br>EP 1059707 A2 13-12-2000<br>JP 2000349369 A 15-12-2000   |

Form PCT/ISA210 (patent family, second entry, 1997)

## フロントページの続き

(81) 指定国 AP(GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW

(74) 代理人 100094400

弁理士 鈴木 三義

(74) 代理人 100107836

弁理士 西 和哉

(74) 代理人 100108453

弁理士 村山 靖彦

(74) 代理人 100110364

弁理士 実広 信哉

(72) 発明者 ウィリアム・エー・クラークソン

イギリス・ハンプシャー・サウサンプトン・SO17・1BJ・ハイフィールド・(番地なし)・  
ユニバーシティ・オブ・サウサンプトン・センター・フォー・エンタープライズ・イノベーション

(72) 発明者 ダンカン・ダブリュ・ジェイ・ハーウッド

イギリス・ハンプシャー・サウサンプトン・SO17・1BJ・ハイフィールド・(番地なし)・  
ユニバーシティ・オブ・サウサンプトン・センター・フォー・エンタープライズ・イノベーション

(72) 発明者 ボール・ダブリュ・ターナー

イギリス・ハンプシャー・サウサンプトン・SO17・1BJ・ハイフィールド・(番地なし)・  
ユニバーシティ・オブ・サウサンプトン・センター・フォー・エンタープライズ・イノベーション

Fターム(参考) 5F072 AB09 AK06 KK30 MM08 PP07